

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**Contribution à l'étude des critères d'injectabilité
des coulis de ciment dans les sols fins**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées (M.Sc.A.)
Spécialité: génie civil

Stéphanie Perret

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise a été réalisée au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, sous la direction des professeurs Gérard Ballivy, du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, et Kamal Khayat, du groupe de recherche sur les bétons. Je les remercie très sincèrement pour leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de ce travail.

C'est grâce aux financements apportés par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada, par Béton Canada et par le Réseau des Centres d'excellence, que cette maîtrise a pu être réalisée efficacement et dans de très bonnes conditions de recherche. Je remercie ces organismes pour leur soutien.

D'une part, je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Thameur Mnif, étudiant au Doctorat en génie civil à l'Université de Sherbrooke, pour son soutien et sa collaboration à certains essais. Ces mêmes essais n'auraient pas pu être réalisés sans l'aide de Martin Lizotte et de Georges Lalonde, techniciens au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, qui ont su également me faire profiter de leurs connaissances et de leur expérience. Je n'oublierai pas Danick Charbonneau, technicien en informatique, pour la réalisation de la majorité des figures de ce mémoire et de la mise en page.

D'autre part, la dernière phase de ce projet n'aurait pu être terminée sans l'assistance de Jean Philippe Vrignaud, stagiaire de l'Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (France). Je tiens donc à le remercier pour sa disponibilité et pour tout le travail qu'il a pu effectuer.

Je terminerai par une pensée profonde pour mon père pour son appui et sa confiance tout au long de mes études; ainsi qu'à ma mère et mon frère pour leur soutien durant les moments difficiles que nous avons connus.

RÉSUMÉ

Des études concernant l'injection de coulis de ciment dans des fissures ont déjà été réalisées. L'application de ce type de traitement à la consolidation ou à l'étanchement de sols devient plus délicate, en particulier dans le cas de sols fins (perméabilité de 10^{-3} à 10^{-4} m/s).

Le travail présenté ici a pour objet l'étude à grande échelle de l'injection de coulis de ciment dans des milieux de faible perméabilité et l'évaluation des paramètres du sol et du coulis pouvant influencer cette progression. Une caractérisation rhéologique complète de coulis de ciment traditionnel et microfin a donc été réalisée. Leur injection à petite échelle dans un sable de granulométrie 160/630 microns, puis dans des cylindres de 250 litres remplis de sable naturel, a permis d'évaluer leur pénétrabilité en fonction de leur viscosité, tendance au ressuage forcé,... L'efficacité du traitement a été évaluée par des essais de perméabilité, d'absorption et de résistance en compression après injection.

Ces modélisations d'injection en laboratoire ont montré que les critères d'injectabilité présentés dans la littérature ne tiennent pas compte de tous les paramètres réellement engagés dans le problème. Les distributions granulométriques du sol et du ciment, leurs caractéristiques avant injection, ne suffisent pas à prévoir la pénétrabilité du coulis. La composition de ce dernier varie pendant l'injection: sa tendance au ressuage forcé crée une augmentation du rapport eau/ciment avec la distance parcourue, d'où une perte en efficacité du traitement. Le sol lui aussi présente des modifications: la propagation du coulis sous pression réarrange les grains et influence la compacité du milieu.

Sur le plan méthodologique, le développement d'essais en semi-grandeur permet la reconstitution fidèle de sols naturels au laboratoire et leur injection comme s'il s'agissait d'un plot d'essai sur chantier. Les paramètres de l'injection (type de coulis, espacement des forages,...) peuvent ainsi être définis selon les caractéristiques que le milieu devra présenter après traitement (perméabilité, résistance).

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
1 INTRODUCTION	1
2 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	4
2.1 Introduction	4
2.2 Les raisons de l'injection	4
2.2.1 Injection de consolidation.....	5
2.2.2 Réparation d'ouvrages endommagés	5
2.2.3 Étanchéisation d'ouvrages souterrains	6
2.2.4 Étanchéisation de barrages	6
2.2.5 Stockage souterrain de déchets radioactifs	6
2.3 Les sols	7
2.3.1 Caractéristiques d'un sol	7
2.3.2 Paramètres principaux	7
2.3.3 Corrélations avec les milieux fissurés.....	12
2.3.4 Essais normalisés d'injectabilité à la colonne de sable	14
2.4 Les produits d'injection	14
2.4.1 Historique.....	14
2.4.2 Rhéologie des coulis de ciment.....	24
2.5 La pénétrabilité des coulis de ciment dans les sols	25
2.5.1 Formules d'injectabilité	25
2.5.2 Cas des ciments microfins	29
2.6 Les techniques d'injection dans les sols	31
2.6.1 Méthodes d'injection.....	31
2.6.2 Espacement des forages	32
2.6.3 Suivi de l'injection	33
2.7 Les injections en semi-grandeur	33
3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	35
3.1 Introduction	35
3.2 Matériaux utilisés	35
3.3 Formulation des coulis.....	37
3.4 Mode de malaxage et essais sur coulis	38
3.4.1 Caractérisation de la fluidité et de l'ouvrabilité des coulis	39
3.4.2 Caractérisation de la stabilité des coulis	41
3.4.3 Caractérisation de l'injectabilité des coulis.....	42
3.5 Essais de perméabilité à l'eau.....	44
3.5.1 Mise en place du sable dans les colonnes	44
3.5.2 Perméabilité des sables avant injection.....	45
3.5.3 Perméabilité après injection	46
3.6 Injection en semi grandeur.....	51
3.6.1 Matériaux	51

3.6.2	Dispositif d'injection	53
3.6.3	Suivi de l'injection	57
3.6.4	Essais après injection	58
3.7	Conclusion	59
4	CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE DES COULIS D'INJECTION	61
4.1	Introduction	61
4.2	Coulis testés et essais réalisés	61
4.2.1	Coulis étudiés	61
4.2.2	Essais réalisés	62
4.3	Résultats des essais et discussion	63
4.3.1	Effets du rapport E/C et du type de ciment.....	63
4.3.2	Effet de l'addition de fumée de silice	70
4.3.3	Effet de l'addition d'agent colloïdal.....	72
4.3.4	Effet de l'addition de bentonite	73
4.4	Conclusions: critères de sélection de coulis.....	75
5	ESSAIS DE PERMÉABILITÉ APRÈS INJECTION	78
5.1	Introduction	78
5.2	Choix des coulis et injection	78
5.2.1	Injection des colonnes de 47 mm de diamètre.....	78
5.2.2	Échantillonnage des colonnes	79
5.3	Résultats des essais et discussion	80
5.3.1	Déroulement des essais	81
5.3.2	Résultats	82
5.3.3	Effet du rapport E/C	83
5.3.4	Effet du ressuage forcé.....	84
5.3.5	Effet de l'ajout d'agent colloïdal.....	85
5.3.6	Rayon d'influence des injections	86
5.4	Conclusion	86
6	INJECTION DE COULIS DE CIMENT EN SEMI-GRANDEUR.....	87
6.1	Introduction	87
6.2	Préparation des essais.....	87
6.2.1	Matériaux et dispositif.....	87
6.2.2	Milieux injectés	90
6.2.3	Suivi des débits et des pressions d'injection.....	92
6.3	Injection des cylindres	92
6.3.1	Cylindre 1	92
6.3.2	Cylindre 2	94
6.3.3	Cylindre 3	95
6.3.4	Pénétrabilité des coulis	98
6.4	Essais après injection.....	99
6.4.1	Carottage des colonnes injectées	99
6.4.2	Essais réalisés	100

6.4.3	Échantillons prélevés.....	100
6.4.4	Absorption et perméabilité à l'eau.....	101
6.4.5	Résistance en compression	102
6.4.6	Conclusion.....	103
6.5	Influence de la teneur en eau du sol	103
6.5.1	Bilan des observations.....	103
6.5.2	Discussion des résultats.....	104
6.6	Conclusion	106
CONCLUSION GÉNÉRALE		108
BIBLIOGRAPHIE.....		111
ANNEXES		115

LISTE DES FIGURES

	Pages
1.1 Organigramme du plan expérimental (phase 1).....	2
1.2 Organigramme du plan expérimental (phases 2 et 3)	3
2.1 Illustration de la loi de Darcy.....	9
2.2 Essais de perméabilité à charge constante (a) ou variable (b).....	11
2.3 Essai Lefranc.....	12
2.4 Courbes granulométriques de différents ciments	19
2.5 Comportement rhéologique d'un coulis	25
2.6 Limites de pénétrabilité des coulis basées sur la granulométrie du terrain	26
2.7 Limites de pénétrabilité des coulis basées sur la perméabilité des terrains	28
3.1 Courbes granulométriques des ciments utilisés.....	36
3.2 Séquence de malaxage des coulis d'injection	39
3.3 Montage de l'essai d'écoulement au cône Marsh	40
3.4 Mini-cône d'affaissement.....	40
3.5 Montage de l'essai de ressuage forcé.....	42
3.6 Montage de l'essai d'injectabilité à la colonne de sable.....	43
3.7 Courbe granulométrique du sable utilisé pour les essais d'injection à la colonne	44
3.8 Vue globale du dispositif des perméamètres.....	47
3.9 Cellule individuelle du perméamètre.....	48
3.10 Composants d'une cellule du perméamètre	49
3.11 Courbes granulométriques de deux échantillons de sable Aimé Coté	52
3.12 Cylindre d'injection	54
3.13 Tubes d'injection.....	55
3.14 Réservoir de coulis et pompe à injection	56
4.1 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur les paramètres de fluidité.....	64
4.2 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur les paramètres rhéologiques	65
4.3 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur le ressuage forcé	66
4.4 Évolution de la durée de l'injection totale selon le seuil de cisaillement des coulis ...	67
4.5 Évolution de la durée de l'injection totale avec la viscosité plastique des coulis	68
4.6 Variations de la hauteur injectée en fonction du taux de ressuage forcé.....	69
4.7 Variations de la hauteur injectée en fonction de l'écoulement au cône Marsh	69
4.8 Taux de ressuage forcé pour les coulis additionnés de fumée de silice	70
4.9 Hauteur injectée par les coulis additionnés de fumée de silice.....	71
4.10 Taux de ressuage forcé pour les coulis additionnés d'agent colloïdal.....	73
4.11 Hauteur injectée par les coulis additionnés de bentonite	74
4.12 Taux de ressuage forcé pour les coulis additionnés de bentonite.....	75
4.13 Évolution de la distance injectée en fonction de la viscosité plastique des coulis	77
4.14 Évolution de la durée de l'injection totale d'une colonne en fonction du seuil de cisaillement des coulis.....	77

5.1	Échantillons issus des colonnes injectées.....	80
5.2	Exemple de résultat de l'essai de perméabilité	82
5.3	Influence du rapport E/C du coulis sur la perméabilité à l'eau après injection	84
5.4	Influence du ressuage forcé sur le gradient de perméabilité au long des colonnes.....	85
6.1	Cylindre de sable destiné à l'injection.....	88
6.2	Courbes granulométriques des sables utilisés pour les injections en semi grandeur...	89
6.3	Milieux injectés dans les cylindres.....	91
6.4	Cylindre injecté 1.....	93
6.5	Cylindre injecté 2.....	95
6.6	Mise en place du cylindre 3.....	96
6.7	Cylindre injecté 3.....	97
6.8	Patron de carottage des colonnes injectées.....	99
6.9	Répartition des essais sur mortiers carottés.....	100
6.10	Effet de la saturation sur la répartition granulométrique.....	105

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
2.1 Correspondance entre classe granulométrique de sable de colonne et largeur de fissure.....	13
2.2 Composition chimique approximative de ciments	18
2.3 Domaines d'injectabilité des produits d'injection	20
2.4 Consommation de coulis	33
3.1 Composition chimique des ciments	37
3.2 Formulation des coulis testés	38
4.1 Résultats des essais d'injection	67
4.2 Effet de la fumée de silice sur la rhéologie des coulis de ciment type 30	71
5.1 Injection des coulis de ciment microfin (colonnes de 47 mm)	79
5.2 Déroulement des essais de perméabilité à l'eau	82
5.3 Variation de l'efficacité de l'injection avec la distance injectée	85
5.4 Rayon d'influence de l'injection	86
6.1 Matériaux utilisés pour l'injection des cylindres	91
6.2 Vérification de la loi des filtres	98
6.3 Échantillons carottés	100
6.4 Essais d'absorption et de perméabilité	101
6.5 Essais de compression simple	102
6.6 Durée de l'injection dans les colonnes normalisées	104

Chapitre 1

INTRODUCTION

Des produits et des méthodes d'injection sont utilisés depuis plusieurs siècles. Que ce soit pour étancher ou pour consolider des structures dégradées, des milieux rocheux fissurés ou des milieux poreux, on cherche à remplir les vides à l'aide d'un produit liquide se solidifiant plus ou moins dans le temps.

Des études concernant le traitement de fissures par injection ont déjà été réalisées dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke. Ainsi, Niemants (1981) a analysé le comportement des coulis utilisés pour les voiles d'étanchéité de barrages sous l'effet des circulations d'eau et des pressions induites par l'ouvrage. Boudaya (1993) s'est intéressé à la distribution de la pression d'injection dans une fissure et à l'évolution de la rhéologie du coulis de ciment pendant l'injection.

Selon le type de milieu à traiter et l'objectif à atteindre, la formulation de ces produits et leur mode d'injection sont différents. Ainsi, lorsque l'étanchement de sols fins (c'est-à-dire d'une perméabilité à l'eau d'environ 10^{-3} m/s) est recherché, des produits chimiques ou encore des coulis à base de ciment et d'adjuvants chimiques ou minéraux sont utilisés. Ce type de coulis a l'avantage, par rapport aux résines chimiques, d'éviter tout problème de pollution du sous-sol. Mais, pour que ces matériaux cimentaires possèdent une pénétrabilité adéquate dans un sol fin, il faut utiliser des ciments à granulométrie suffisamment fine. Des critères de pénétrabilité doivent donc être définis, tenant compte des paramètres du sol, des caractéristiques physiques et rhéologiques du coulis. Les essais d'injection à petite échelle, dans des sables sont souvent pratiqués, mais il sont relativement limités puisque les colonnes d'injection de petites tailles créent des effets de bord importants et ne permettent pas de mettre en pratique les méthodes d'injection utilisées en chantier. Des travaux à grande échelle ont donc été pratiqués par différents auteurs que ce soit des expériences sur des murets de maçonnerie endommagés [PAILLERE et coll, 1993] ou dans des réservoirs de grandes dimensions [PAILLERE, 1984; SMOAK et coll, 1993; SHIMODA et coll, 1982].

Dans le cadre de cette étude, une méthodologie de caractérisation de coulis de ciment destinés à l'injection de sols fins est présentée (Figures 1.1 et 1.2). Elle comprend une étude rhéologique et des essais d'injection dans des sables, à petite échelle. Les résultats d'essais de perméabilité après injection des mélanges les plus performants sont ensuite présentés. Enfin, l'injection de quelques mélanges dans des cylindres (1,20 m de hauteur par 0,5 m de diamètre) de sable représentant un volume 1700 fois plus grand que celui considéré à petite échelle, est pratiquée. Des essais permettant de vérifier l'efficacité des coulis sont également effectués sur des échantillons carottés dans le cylindre après mûrissement du coulis.

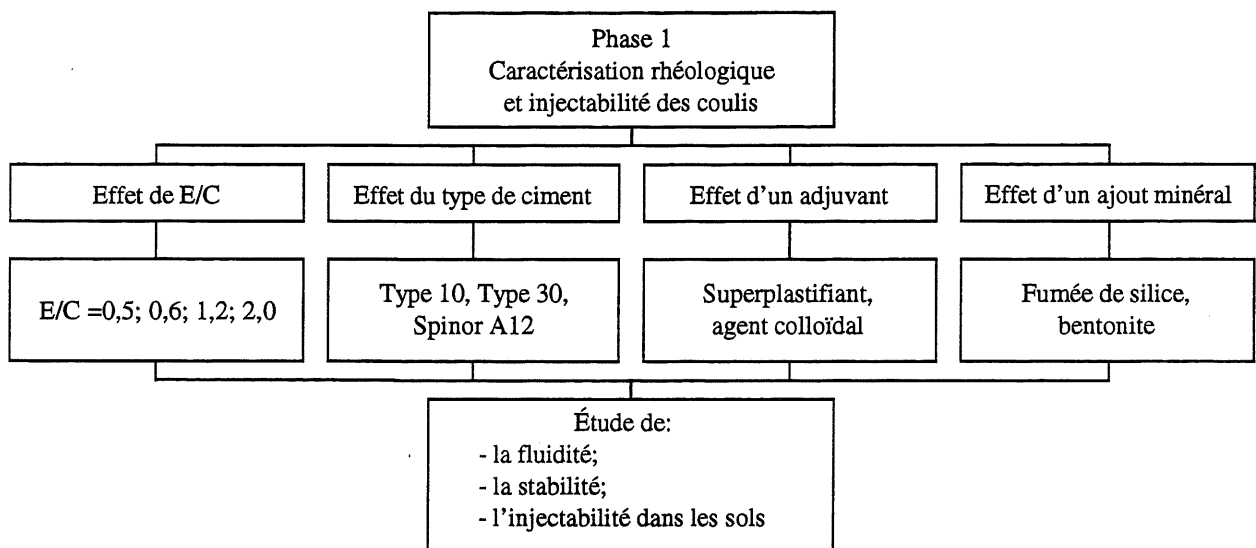


Figure 1.1 Organigramme du plan expérimental (phase 1)

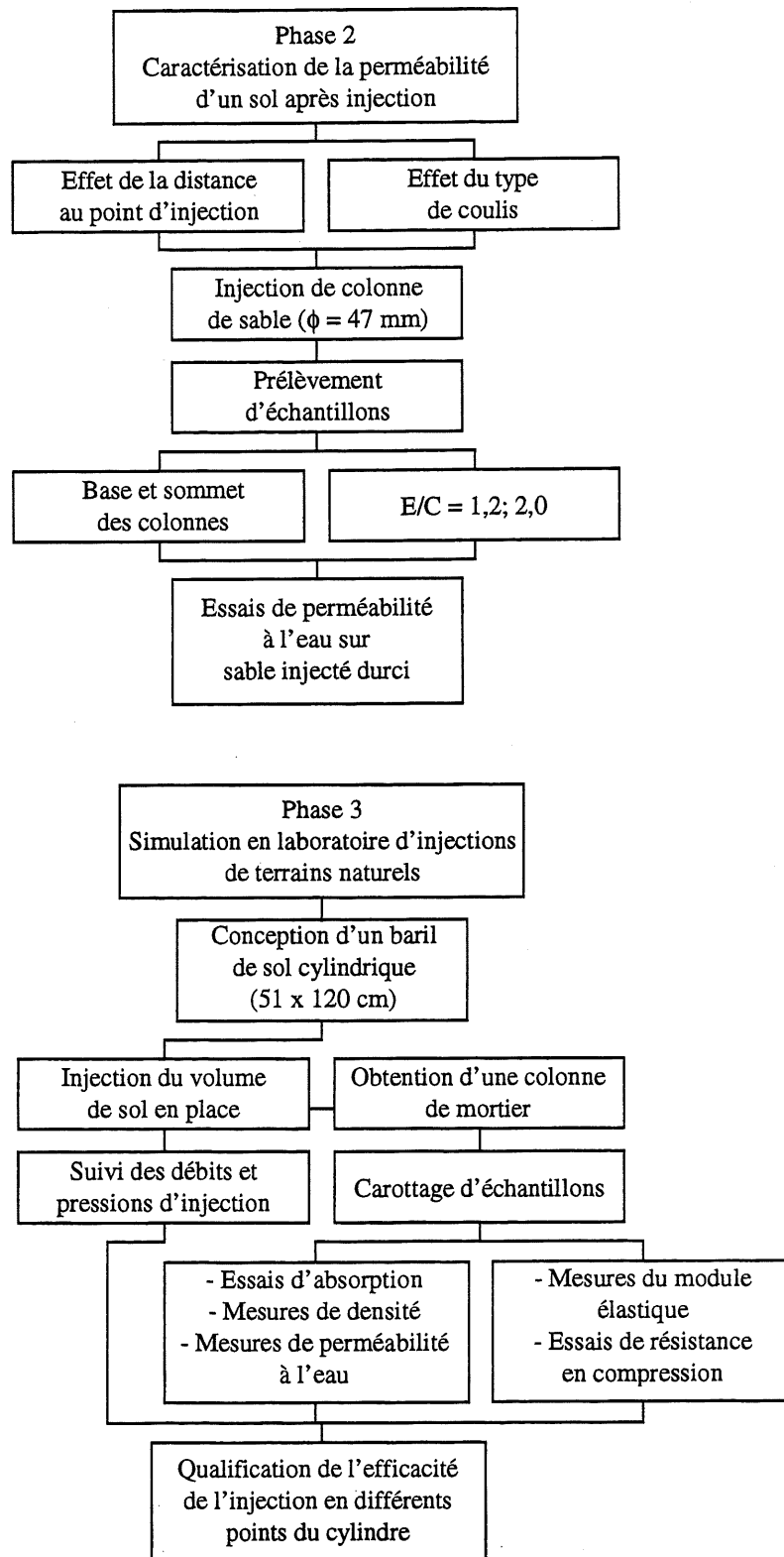


Figure 1.2 Organigramme du plan expérimental (phase 3)

Chapitre 2

ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Introduction

Dans les années 1800, les premiers travaux d'injection de coulis de ciment ont été réalisés dans des milieux fissurés lors de réparations de maçonneries endommagées [HOULSBY, 1990]. Au fil des années, les applications de ces techniques se sont multipliées dans le domaine du génie civil. Par conséquent, les produits utilisés se sont également diversifiés, chacun étant adapté à tel ou tel type de travaux (étanchéisation, renforcement de fondations, ...).

Depuis plusieurs années, des études se sont développées en rapport avec l'injection dans les sols. Même si des corrélations avec les milieux fissurés existent, l'injection en milieux poreux demeure plus délicate: la probabilité de rencontrer des hétérogénéités dans la formation est plus grande, les canaux d'écoulement disponibles pour le coulis sont plus tortueux. Une bonne connaissance des caractéristiques du sol à traiter, une bonne formulation des coulis adaptés aux objectifs à atteindre, sont donc nécessaires.

2.2 Les raisons de l'injection

Dans de nombreux domaines du génie civil, il est nécessaire de faire appel à des travaux d'injection. Les méthodes et les produits utilisés varient en fonction de l'objectif à atteindre:

- consolidation de fondations rocheuses ou d'un sol;
- étanchéisation d'ouvrages souterrains (tunnels, galeries de mines, ...);
- réparation structurale de maçonneries ou de bétons endommagés;
- étanchéisation de barrages;
- stockage souterrain de déchets radioactifs.

2.2.1 Injection de consolidation

Il peut s'agir de renforcer, à l'aide du coulis injecté, un sol trop lâche qui serait incapable de supporter la charge induite par la construction d'un ouvrage. Dans ce cas, les produits d'injection utilisés doivent posséder une bonne résistance mécanique et une bonne pénétrabilité.

Le cas de l'effondrement local d'une voûte dans un tunnel de chemin de fer, en 1960, montre l'efficacité, depuis longtemps reconnue, des injections. Il s'agit du tunnel du Boubard [CAMBEFORT, 1964], au centre de la France, dans lequel un tas de blocs de schistes s'est effondré. Des injections de coulis contenant non seulement du ciment et de l'argile, mais aussi du sable, ont été pratiquées dans l'éboulis lui-même, afin de pouvoir reperforer le tunnel. Cette composition de coulis était essentiellement destinée à donner des résistances suffisantes: le rapport eau/liant était de 0,8; avec 75% en masse de ciment, 25% d'argile et l'addition de 75% de sable relativement à la masse totale de liant. Les injections ont été réalisées selon trois lignes parallèles à l'axe du tunnel, espacées de 2 m, avec 4 m entre chaque forage (ceux-ci étant disposés en quinconce). Le traitement a été effectué tant qu'il y avait absorption par le sol. Le creusement du tunnel a pu être assuré par la suite.

2.2.2 Réparation d'ouvrages endommagés

Les types de problèmes traités sont multiples. Il peut s'agir de bétons, de maçonneries. L'Université de Sherbrooke a été associée à de nombreux projets de ce type:

- injection de microfissures sur le barrage Daniel-Johnson d'Hydro-Québec. Une simulation en laboratoire a d'abord été réalisée sur des dalles de béton armé: fissuration artificielle, injection, suivi des variations de pression, d'ouverture des discontinuités et étude de différents types de coulis.
- réparation sous l'eau des piles d'un pont marin, à Montréal: l'effet des contraintes thermiques, du retrait en début de construction et aussi des réactions alcalis-granulats étaient à l'origine d'un endommagement important des structures d'où injection des fissures et réparation des zones dégradées en surface à l'aide de coulis à base soit de résine, soit de ciment microfin [TREMBLAY et coll., 1994]. Ce coulis de ciment microfin (Spinor A12) possédait un rapport

E/C de 0,55 et une teneur en superplastifiant de 2 % en extrait sec. Caractérisé par une bonne fluidité, il a permis l'injection des fissures suffisamment profond et la préservation de l'intégrité des structures.

- réparation d'un mur d'écluse, à Kingston (Ontario), composé de pierres, roches et mortier dégradés: des formations sableuses, des cavités sont apparues au sein de la structure. Un compromis a été trouvé entre un coulis de mortier pour traiter les cavités et un coulis soit de ciment microfin, soit de ciment Portland pour consolider les murs de maçonnerie. Les injections primaires ont été réalisées avec un coulis de ciment type 30 et les injections secondaires avec un coulis de ciment microfin [MNIF, 1996].

2.2.3 Étanchéisation d'ouvrages souterrains

Suite à la réalisation du soutènement d'un tunnel ou d'une galerie de mine, des vides peuvent apparaître en arrière des aciers de soutènement: ils doivent être comblés pour éviter le passage de toute infiltration dans le tunnel.

2.2.4 Étanchéisation de barrages

L'étanchéité des barrages, en terre ou en béton, est assurée par la réalisation d'un rideau d'injection pseudovertical sous l'ouvrage. Selon la formation sur laquelle repose le barrage, il faut adapter les produits d'injection [NIEMANTS, 1981].

2.2.5 Stockage souterrain de déchets radioactifs

La recherche de sites appropriés à l'enfouissement de déchets radioactifs pose le problème de la préservation des eaux souterraines exposées à la contamination par lessivage. Les paramètres hydrogéologiques et écologiques sont très importants relativement au choix de ce site et, lorsque cela est possible, on cherchera à avoir un sol le moins perméable et le plus uniforme possible: ainsi son traitement par injection sera moins coûteux.

2.3 Les sols

Un sol est constitué d'un ensemble de particules solides entourées de vides. À l'état naturel, ces particules solides sont des grains de différents minéraux, de tailles variables alors que les vides peuvent être remplis d'eau, d'air, ou d'eau et d'air en proportions variables [HOLTZ et coll., 1981].

2.3.1 Caractéristiques d'un sol

Sur un plan purement géotechnique, on dispose de paramètres permettant de quantifier le volume total des vides d'un sol, le volume d'eau qu'il contient ou encore sa distribution granulométrique. Mais, vis à vis de l'injection, ces caractéristiques ne sont pas suffisantes pour espérer prédire une bonne ou une mauvaise injectabilité. En effet, à un volume de vides donné, on peut associer différentes configurations c'est-à-dire différentes distributions des petits et des gros pores. De plus, cette distribution et la porosité du sol vont être fonction, non seulement de la granulométrie des grains, mais aussi de la compacité du milieu. Plus le sol est compacté, plus les pores sont réduits.

Toutefois, afin d'avoir une «image» du sol considéré, il est intéressant de déterminer les caractéristiques énoncées auparavant. Elles seront complétées, lors d'études à des fins d'injection, par une détermination de la conductivité hydraulique du sol.

2.3.2 Paramètres principaux

a) Caractéristiques physiques

Dans le cas des sols granulaires, comme les graviers et les sables, on peut caractériser ces milieux par trois paramètres principaux:

- leur courbe granulométrique: elle nous donne la distribution des grosseurs de particules. Elle peut être étalée ou serrée, uniforme ou non uniforme. Le paramètre C_u , coefficient d'uniformité, tel que

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.1)$$

et avec d_x le diamètre des grains (mm) correspondant à $x\%$ de passant en masse, caractérise cette distribution. Plus C_u est faible, plus le sol est de granulométrie uniforme. Pour un sol qui comporterait des grains d'une seule grosseur, on aurait $C_u = 1$. Pour des sables à granulométrie très peu étalée (sables de plage), on a $C_u = 2$ à 3 .

- leur porosité en place:

$$n = \frac{V_v}{V_T} \times 100 \quad (2.2)$$

avec V_v = volume des vides;

V_T = volume total de l'échantillon de sol.

La porosité donne la proportion des vides c'est-à-dire le volume qui serait à combler par une injection. Elle est fonction de la compacité du sol: pour reproduire en laboratoire un sol tel qu'il est à l'état naturel, il faut définir un mode de mise en place, c'est-à-dire un mode de compactage précis afin d'être assuré que l'on a la bonne porosité.

- leur teneur en eau:

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.3)$$

avec M_w = masse d'eau;

M_s = masse de grains solides.

La teneur varie de 0% pour les sols secs à quelques 1000% pour certains sols d'origine marine et organique. La teneur en eau de la plupart des sols se situe toutefois bien en deçà de 100% [HOLTZ et coll., 1981]. Cette eau va bien entendu être chassée par le coulis lors de l'injection: celui-ci prendra donc, en plus de la place de l'air, la place de l'eau contenue dans les pores du sol.

b) Conductivité hydraulique d'un milieu poreux

La plupart des milieux pulvérulents, sables, graviers, alluvions, possèdent une porosité de 20 à 35%. Ces vides forment un réseau de canaux plus ou moins tortueux et qu'il est difficile de caractériser en laboratoire. Aussi, au lieu de définir la morphologie des pores (par essais de porosimétrie au mercure), on procède plus souvent à une mesure de la conductivité hydraulique du sol.

Si l'injection est utilisée à des fins d'étanchéisation d'un sol, il est important de connaître la conductivité hydraulique du sol avant et après traitement: la diminution de la conductivité permet d'avoir une idée de l'efficacité de l'injection.

La conductivité hydraulique (ou perméabilité à l'eau) est définie comme le coefficient de proportionnalité reliant le débit q à travers une section transversale de sol A , au gradient hydraulique i ($i = \frac{\Delta h}{L}$) et à cette section A (Figure 2.1):

$$q = k \times \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Loi de Darcy (1856)} \quad (2.4)$$

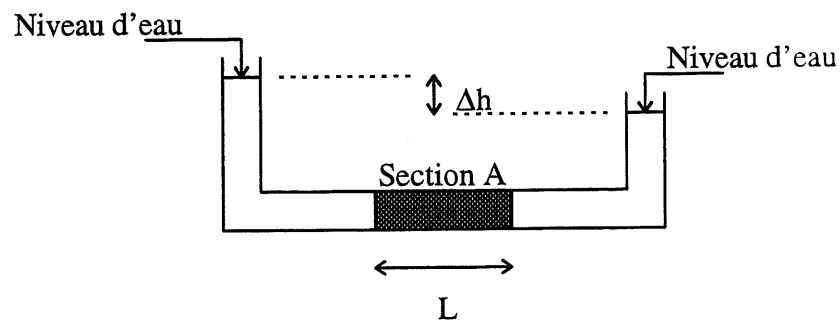


Figure 2.1 Illustration de la loi de Darcy

Le coefficient k définit à quelle vitesse l'eau circule à travers le sol. Cette loi est valable dans le cas d'écoulements laminaires. Elle est influencée par d'autres paramètres du sol [HOLTZ et coll., 1981]:

- la porosité: elle modifie l'écoulement dans le sol;
- le diamètre effectif des pores;
- la tortuosité;
- le degré de saturation: en général, k est défini pour un sol saturé.

Pour le cas de fluides autres que l'eau, la formule de Kozeny-Carman [FREEZE et coll., 1979] est utilisée. Elle fait intervenir un coefficient de forme C_f , l'indice des vides du sol e , le périmètre mouillé moyen S et la masse volumique des grains solides ρ_s . Le coefficient K (coefficient de perméabilité à ce fluide) devient alors:

$$K = K_{matériau} \times \frac{\rho_{fluide} \times g}{\mu_{fluide}} \quad (2.5)$$

avec ρ_{fluide} : masse volumique du fluide traversant le milieu;

μ_{fluide} : viscosité du fluide traversant le milieu;

g : accélération de la pesanteur (9.81 N/kg).

et

$$K_{matériau} = C_f \times \frac{e^3}{\rho_s^2 \times S^2 \times (1+e)} \quad (2.6)$$

Le coefficient de forme C_f est défini par:

$$C_f = \frac{C_s}{T^2 \times S^2} \quad (2.7)$$

avec T : coefficient de tortuosité;

et C_s : 0,50 pour des canaux circulaires;
0,33 pour des canaux rectangulaires;
0,56 pour des canaux carrés.

Ainsi, en laboratoire, on détermine la conductivité hydraulique d'un sol avant injection en effectuant des essais de perméabilité à charge variable ou constante (Figure 2.2.). Il faut prendre soin de donner au sol la compacité qu'il possède sur le terrain afin de réaliser un essai suffisamment représentatif.

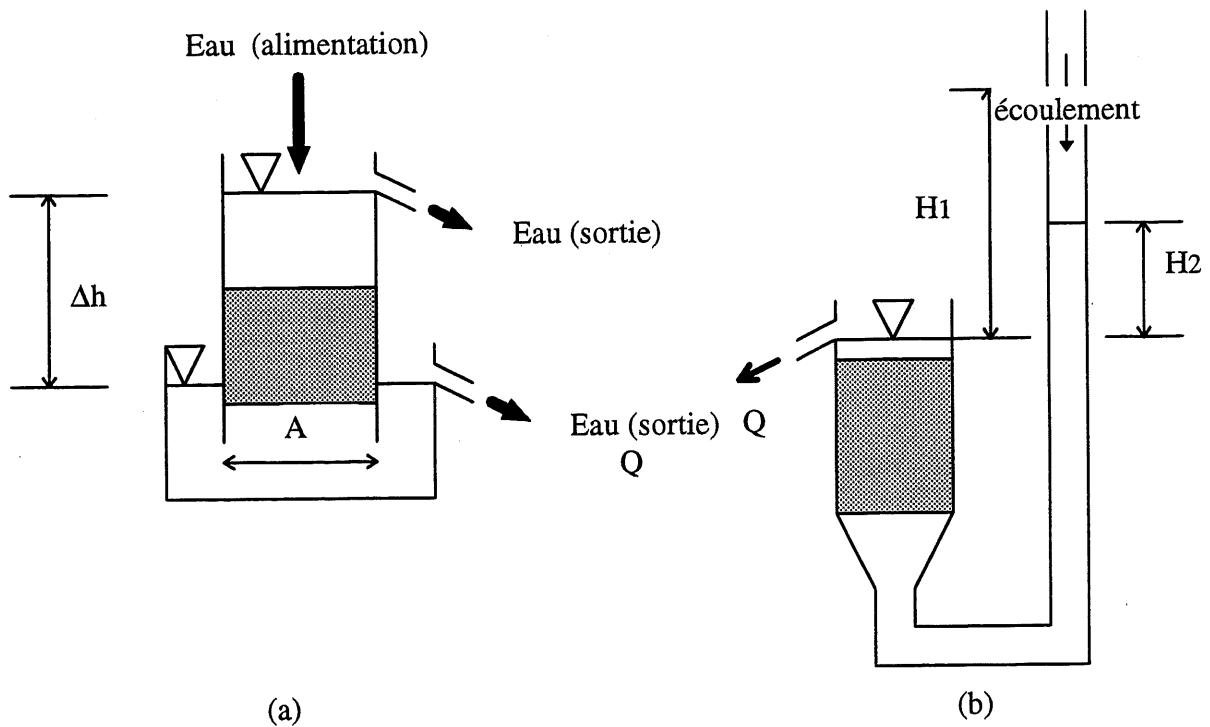


Figure 2.2 Essais de perméabilité à charge constante (a) ou variable (b)

Sur le terrain, la perméabilité à l'eau est déterminée à partir d'essais d'injection d'eau ou essais Lefranc. Le principe de cet essai est de créer une variation de charge dans une cavité préalablement creusée dans le sol au fond d'un forage (Figure 2.3). On suit alors l'évolution du volume d'eau injecté dans le sol en fonction du temps. Ainsi le débit injecté et par conséquent la conductivité hydraulique du milieu sont connus. Étant donné son faible rayon d'action, cet essai donne une perméabilité locale et peut donc ne pas déceler toutes les hétérogénéités d'un milieu. Ces essais peuvent être réalisés à nouveau après injection du milieu afin de vérifier l'efficacité du traitement.

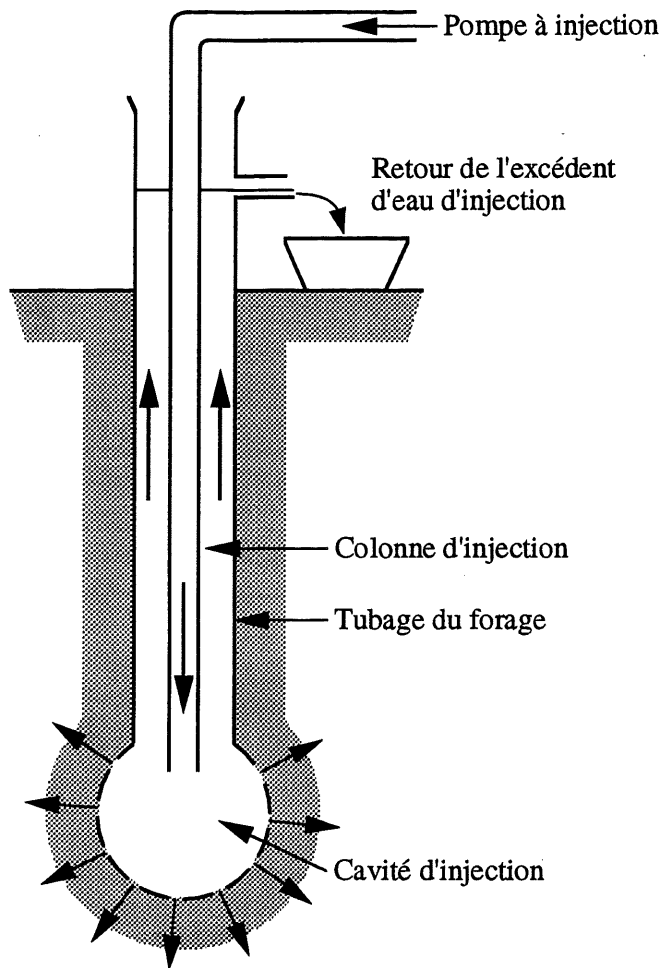


Figure 2.3 Essai Lefranc

2.3.3 Corrélations avec les milieux rocheux fissurés

Les procédés d'injection sont relativement simples et bien maîtrisés dans le cas de traitement des fissures. Certains chercheurs [HÄSSLER, 1992] ont modélisé, à l'aide d'outils informatiques, le cheminement d'un coulis à travers un réseau de fissures. En ce qui concerne l'injection en milieu poreux (alluvions, sables, graviers), des produits nouveaux ont du être développés afin d'assurer la pénétration des coulis dans les pores du sol: le cheminement est plus tortueux et les interstices sont souvent plus fins que dans le cas de la majorité des fissures.

Cependant, il existe des similitudes entre milieux rocheux et poreux. Tout d'abord, comme les roches, les sols présentent des hétérogénéités: des variations d'ouverture de fissures, on passe à des variations de granulométrie. La plupart des formations alluvionnaires sont ainsi constituées de couches de sable, de gravier présentant par conséquent des variations de perméabilité. Tout comme un coulis pénètre plus facilement dans des fissures larges, il pénétrera plus facilement dans des couches à forte conductivité hydraulique. Lorsque celles-ci sont imprégnées et rendues étanches, le coulis se propage dans les couches à faible perméabilité. De plus, que l'on soit dans des fissures fines d'ouverture constante ou dans des alluvions, l'injection du coulis peut donner lieu à du ressuage forcé, c'est-à-dire à un phénomène de filtration lié à la pression d'injection. Quand l'injection est terminée, c'est un phénomène de ressuage statique qui peut apparaître: le coulis sédimente, il y a ségrégation dans les fissures d'une roche ou dans les pores d'un sol.

On comprend aisément que l'étude de l'injection en milieu poreux met en jeu de nombreux paramètres du sol lui-même (et également du coulis testé). Par contre sa modélisation en laboratoire est plus aisée que celle d'une fissure. Dans de nombreuses études antérieures, les fractures ont été créées par fissuration hydraulique de dalles de béton, nécessitant un matériel et une mise en œuvre importants [BOUDAYA, 1993]. Pour un sol, on peut se contenter d'utiliser un échantillon de sable mis en place dans une colonne de plexiglas: il faut tout de même veiller à ce que sa compacité soit fidèle à celle du sol en place.

Ainsi, il a été montré que l'ouverture d'une fissure est équivalente, vis à vis de l'injection dans une colonne de plexiglas, à une classe granulométrique donnée de sable [PAILLÈRE et coll., 1993] (Tableau 2.1).

TABEAU 2.1 CORRESPONDANCE ENTRE CLASSE GRANULOMÉTRIQUE DE SABLE DE COLONNE ET LARGEUR DE FISSURE [PAILLÈRE et coll., 1993]

Classe granulométrique du sable de la colonne (mm)	Largeur équivalente de fissure (mm)
0,160 / 0,80	0,1 à 0,2
0,630 / 1,25	0,2 à 0,3
1,60 / 2,50	0,3 à 0,5

2.3.4 Essais normalisés d'injectabilité à la colonne de sable

Un essai de laboratoire spécifique à l'injection a été développé et normalisé en France en 1986 [Norme européenne NF P18-891, 1986] (Annexe 1). Cet essai découle des corrélations établies entre milieux poreux et milieux rocheux fissurés.

Une colonne de plexiglas de 22 mm de diamètre et 36 cm de longueur est remplie d'un sable de granulométrie 0,630/1,25 mm et dont la distribution granulométrique est imposée. Le sable est introduit de façon normalisée afin d'avoir une compacité donnée une fois en place. Il peut être testé à l'état sec ou humide. Le coulis est alors injecté à la base de la colonne maintenue verticale, sous une pression d'injection de 75 kPa (11 psi). Selon la hauteur atteinte par le coulis dans la colonne de sable, son aptitude à pénétrer le milieu testé est définie. On simule l'injection dans des fissures de largeur autre que 0,2 ou 0,3 mm en remplaçant le sable 0,630/1,25mm par une autre granulométrie. Ce type d'essai permet donc de caractériser l'aptitude à l'injection d'un coulis, que ce soit en milieu fissuré ou dans un sol.

2.4 **Les produits d'injection**

2.4.1 Historique

C'est en 1802 que Charles de Bérigny a pratiqué les premières injections par gravité lors de la réparation du port de Dieppe (France). Il utilisait alors un coulis de mortier additionné de pouzzolanes [HOULSBY, 1990].

Jusqu'à la fin des années 1880, de nombreux articles ont été publiés sur le sujet par des ingénieurs comme Charrie, Raynal, Collin et Beaudemoulin. Il s'agissait là de développer des techniques de réparation de maçonneries, de renforcement de fondations.

Vers 1845, Johnson a fixé les proportions et températures convenables pour la fabrication du ciment Portland. Mais, ce n'est qu'en 1876 qu'a été utilisé le premier coulis de ciment, par

Thomas Hawksley. Il venait de développer un procédé d'injection de fissures dans le rocher. Ses techniques ont été instaurées dans le domaine minier puis dans le génie civil.

Au début des années 1900, d'autres types de coulis sont apparus:

- 1911 : coulis chimiques;
- 1919 : émulsions de bitume;
- 1925 : procédé Joosten.

Le premier inconvénient de ces produits a bien sûr été leur coût. Les recherches se sont alors orientées vers les coulis à base de ciment puis de ciment et d'argile (afin d'améliorer leur stabilité) pour l'injection de milieux alluvionnaires.

Plus tard (années 1960), se sont développés les coulis chimiques. Ces produits sont utilisés lorsqu'aucune autre solution n'est envisageable pour le traitement de milieux à très faible perméabilité. Mais, là aussi, leur utilisation pose quelques problèmes et en particulier des problèmes de pollution des nappes d'eau. Certains pays ont donc remis en cause, voire interdit, l'usage de ces résines. Il leur fallait alors fabriquer des coulis de pénétrabilité équivalente à celle des résines mais non polluants et moins coûteux. En France, aux États-Unis et au Japon, ce sont les ciments microfins qui se sont développés.

a) Coulis chimiques

Sous forme liquide, ces produits ne contiennent aucune particule de dimension mesurable. Ils ont un comportement rhéologique newtonien et sont capables de pénétrer dans des milieux de perméabilité à l'eau très faible ($<10^{-3}$ m/s).

On distingue, d'une part, les gels de silicates. Ces solutions de colloïdes siliciques, chargés négativement, sont neutralisées par un réactif gélatineux dans le milieu à injecter. Ces produits permettent l'injection de terrains de perméabilité comprise entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s. Par contre, les résistances induites par les gels de silice sont faibles. D'autre part, il existe des résines organiques

synthétiques. Elles se polymérisent au bout d'un certain temps et ainsi un solide plus ou moins résistant se forme. Sur le plan pratique, il est nécessaire de maîtriser parfaitement la fluidité du produit et son temps de prise. On les utilise généralement pour des travaux nécessitant de petites quantités. Elles sont intéressantes pour les travaux d'étanchéité puisqu'elles pénètrent des sols très fins, jusqu'à 10^{-5} m/s en terme de perméabilité à l'eau [KAROL, 1990].

b) Coulis de ciment

Aujourd'hui la plupart des travaux d'injection font appel à des coulis à base de ciment Portland. Mais, il existe également des ciments au laitier de hauts fourneaux et des ciments dits microfins. Les performances qu'ils confèrent aux coulis fabriqués sont fonction de leur composition chimique et de leur finesse.

- Les ciments Portland

Les ciments usuels, au nombre de cinq et définis par l'Association Canadienne de Normalisation (ACNOR), sont utilisables pour la fabrication de coulis d'injection. Chacun répond à des conditions imposées par le milieu à traiter:

- le type 10, le moins coûteux, est souvent utilisé en d'autres postes sur le chantier. Si le milieu à traiter n'est pas trop contraignant (fissures très ouvertes ou sols très perméables). Il peut être utilisé dans la plupart des travaux de fondation;
- les types 20 et 50 sont utilisés en cas d'attaque par les sulfates (attaques sévères pour le type 50);
- le type 30, plus fin que les autres ciments Portland, permet de traiter des fissures plus fines. Sa finesse est en effet d'environ 450 à 600 m^2/kg alors qu'elle n'est que de 300 à 400 m^2/kg pour le type 10, limitant ainsi sa capacité à pénétrer le milieu. Il faut dire que même si les diamètres maximum des particules de ces deux ciments sont quasiment identiques (100 microns pour le type 10 et 80 à 90 microns pour le type 30), leurs diamètres correspondant à 50 % de passant (en masse) sont très différents: environ 19 microns pour le type 10 et seulement 8 microns pour le type 30. La distribution des

particules n'est donc pas tout à fait la même et assure au type 30 une meilleure pénétrabilité.

- Les ciments de laitier

Ils sont fabriqués à partir de laitier granulé, de gypse et de moins de 5% de clinker de ciment Portland. Dans les usines métallurgiques, à la sortie des hauts fourneaux, le laitier (gangue de minerai de fer+fondant+cendre) subit une trempe (appelée granulation). Il est ainsi vitrifié et possède un pouvoir hydraulique: quasiment aucun cristal ne s'est formé et la chaleur de cristallisation du laitier n'a pas pu se dégager [PAPADAKIS et coll., 1966]. Les ciments de laitier offrent une résistance aux sulfates plus importante que les ciments Portland type 20 ou 50 [HOULSBY, 1990]. De plus, leur finesse (400 à 500 m²/kg) permet l'injection de milieux non traitables par certains ciments Portland.

- Les ciments microfins

Développés actuellement, ils permettent l'injection de fissures fines ou de milieux peu perméables. Ils sont moins coûteux et non toxiques si on les compare aux résines.

Dans la littérature, un liant microfin est défini comme «un liant hydraulique dont le taux de mouture est tel que 98% des grains ont un diamètre inférieur à 16 µm et 50% un diamètre inférieur à 5 µm. Un liant microfin est également caractérisé par une surface spécifique élevée: supérieure à 700 m²/kg» [BENHAMOU, 1994]. On pourra se reporter à la figure 2.4 pour observer la courbe granulométrique de divers types de ciments ainsi qu'au tableau 2.2 pour leurs compositions chimiques.

Ces ciments microfins sont fabriqués à partir de clinker de ciment Portland additionné ou non de laitier. Les premiers sont apparus au début des années 1980 (Onoda Cement Co. Ltd, Japon):

- MC 500 : mélange de laitier et de ciment Portland jouant le rôle d'activateur;

- MC 100 : développé aux Etats-Unis à partir de l'étude du MC 500. Il est composé de 100% de laitier, activé par 5% d'hydroxyde de sodium. Sa surface spécifique est supérieure à 950 m²/kg (parfois jusqu'à 1300 m²/kg) et plus de 97% des particules ont un diamètre inférieur à 7,8 µm.

TABLEAU 2.2 COMPOSITION CHIMIQUE APPROXIMATIVE DE CEMENTS [HOULSBY, 1990; CEMENTS D'ORIGNY, 1993]

	Type 10	MC 100	MC 500	Spinor A12
SiO ₂ (%)	22	35	31	27
Al ₂ O ₃ (%)	5	16	12	16
Fe ₂ O ₃ (%)	3	0,5	1	3
CaO (%)	65	43	48	47
MgO (%)	1	3	6	3
SO ₃ (%)	2	0,5	1	2

La compagnie Blue Circle Cement produit également des ciments microfins de base Portland:

- Microcem 550: avec une surface spécifique de 525 à 575 m²/kg, il bénéficie également d'une haute résistance initiale;
- Microcem 650 SR: en plus de sa haute résistance initiale, il est plus fin que le Microcem 550 et possède une surface spécifique de 625 à 675 m²/kg. Il est également résistant aux sulfates.

En France, la compagnie Ciments d'Origny a commercialisé le premier ciment microfin européen en 1985: le SPINOR A (Spécial Injection d'Origny, type A). Depuis 1992, c'est toute une gamme de liants microfins qui est proposée par cette compagnie [BENHAMOU, 1994], comme par exemple:

- le Spinor A12: 80% de laitier, 16% de clinker, 4% de gypse (base laitier)
98% des grains ont un diamètre inférieur à 12 µm
surface spécifique: 840 m²/kg
- le Spinor E12: 97% de clinker, 3% de gypse (base Portland)
98% des grains ont un diamètre inférieur à 12 µm
surface spécifique: 1200 m²/kg

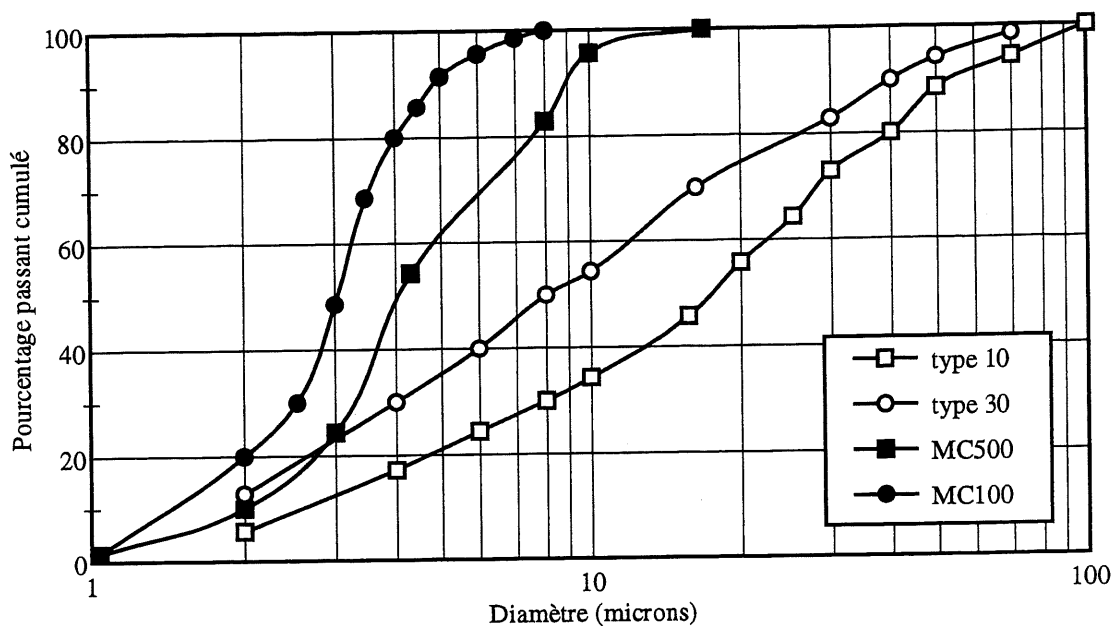


Figure 2.4 Courbes granulométriques de différents ciments [MNIF, 1992]

La compagnie Lafarge (France) produit également un ciment ultrafin commercialisé depuis les années 1990: le Lanko 737. Il est obtenu en sélectionnant la fraction fine d'un ciment Portland ordinaire. Un fluidifiant est incorporé directement au ciment. Sa surface spécifique est d'environ $780 \text{ m}^2/\text{kg}$.






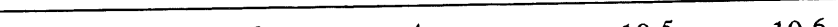

Par rapport aux ciments de base Portland, les liants microfins de base laitier offrent:

- des résistances mécaniques comparables à celles des ciments Portland normaux (excepté à jeune âge);
- une meilleure résistance aux agressions chimiques (due à une diminution de la quantité de chaux consommée par le laitier);
- une meilleure pénétrabilité dans les milieux à faible perméabilité (Tableau 2.3).

Toutefois, si la finesse de ces matériaux est un avantage important, le fait qu'ils exigent une quantité d'eau légèrement plus grande que les ciments traditionnels, pour obtenir un coulis

suffisamment fluide, peut créer des problèmes de stabilité. Il est alors d'usage d'incorporer un superplastifiant à ces coulis: le rapport eau / ciment (E/C) peut ainsi être diminué.

TABLEAU 2.3 DOMAINES D'INJECTABILITÉ DES PRODUITS D'INJECTION [KAROL, 1990; BENHAMOU, 1994]

Coulis	Gravier	Sable			Silt	Argile
		Grossier	Fin	Ultrafin		
Ciment						
Ciment + argile	 Spinor A12					
Gel silicate de soude dur						
Gel silicate de soude semi dur						
Résine						
Perméabilité (m/s)						
Particules (mm)						

c) Ajouts

Les matériaux que l'on peut ajouter au ciment lors de la fabrication d'un coulis sont nombreux. Ils permettent de diminuer le coût du mélange, ou encore avoir une influence sur les caractéristiques du coulis.

- Matériaux inertes

Ils peuvent être utilisés pour injecter des milieux où l'on rencontre des vides importants. Un coulis ordinaire pénétrerait sans problèmes mais il faudrait utiliser une grande quantité de ciment. Dans ce cas, il est tout à fait possible d'ajouter des matériaux secs comme du sable, des granulats, afin de combler plus facilement les vides. Des matériaux de forme arrondie ayant une

bonne distribution granulométrique sont recherchés préférentiellement afin de faciliter le pompage du coulis et d'éviter des effets de ségrégation dans les vides.

- Fumée de silice

C'est en fait de la microsilice issue des fumées émises par les fours électriques de fabrication d'alliages de silicium et notamment de ferrosilicium. Ce produit présente des particules de couleur plus ou moins foncée de diamètre moyen 0,1 μm . Sa surface spécifique est d'environ 20 000 à 25 000 m^2/kg .

- Cendres volantes

Dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon, la combustion libère des cendres plus ou moins denses. Les plus légères restent en suspension dans les gaz s'échappant de la chambre de combustion et sont ensuite recueillies: ce sont les cendres volantes. Leur composition chimique varie de façon significative d'une centrale à une autre, le type de charbon consommé n'étant pas le même. Les particules de cendres volantes ont des diamètres compris entre 1 et 100 μm . Elles sont constituées de silice vitreuse et de très peu d'éléments cristallisés. Elles possèdent des propriétés pouzzolaniques. Les cendres de classe F (silico-alumineuses) comportent une teneur en chaux inférieure à 10% et n'ont pas de pouvoir liant. Les cendres de classe C (silico-calcaires) sont très riches en chaux, certaines sont hydrauliques [AÏTCIN, 1996]. Ces cendres volantes permettent de fabriquer des coulis présentant une chaleur d'hydratation réduite, une meilleure maniabilité et une meilleure durabilité.

- Bentonite

Étant donné la polarité de ses feuillets, la bentonite (phyllosilicate) attire d'autres particules électrostatiquement. Ainsi, elle réduit le phénomène de ségrégation dans les coulis [HOULSBY, 1990]. Il faut cependant être prudent, dans l'utilisation de ce genre de produit puisque tous les types de bentonite ne se comportent pas de la même façon. L'incorporation de la bentonite est une

des phases délicates de la préparation d'un coulis: au contact de l'eau, la bentonite gonfle. On peut donc être confronté à quelques problèmes lors du malaxage sur le chantier. Pour cette raison, la bentonite est, de préférence, mélangée à l'eau 24 heures avant et ajoutée au coulis sous forme liquide, dans le malaxeur. Tous les auteurs ne s'entendent pas sur les avantages que procure l'utilisation d'une bentonite dans les coulis. Certains considèrent qu'il n'y a pas d'autres moyens pour diminuer la ségrégation dans les coulis alors que la bentonite tend à faire augmenter leur viscosité et leur seuil de cisaillement [HAKANSSON, 1992]. Ainsi elle limiterait la pénétration dans les pores d'un sol ou dans les fissures d'une roche [HOULSBY, 1990].

d) Adjuvants

Un adjuvant est un ingrédient chimique, autre que le ciment, l'eau, ou les ajouts minéraux, que l'on introduit dans le mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage. Ce produit, incorporé à faible dose dans des bétons, mortiers ou coulis, entraîne des modifications de leurs propriétés ou de leur comportement. Principalement, il permet une amélioration de l'ouvrabilité du béton ou du coulis et par conséquent de sa fluidité et de sa stabilité. Toutefois, il est connu que l'introduction d'adjuvant peut avoir des effets secondaires néfastes: le type d'adjuvant et son dosage doivent être soigneusement déterminés afin d'éviter en particulier tout problème d'incompatibilité ciment-adjuvant.

Selon Dodson (1995), on peut classer les adjuvants en quatre grandes catégories:

- ceux qui dispersent les grains de ciment: réducteurs d'eau, superplastifiants;
- ceux qui modifient la cinétique de la réaction d'hydratation: accélérateurs ou retardateurs;
- ceux qui réagissent avec les produits de la réaction d'hydratation: agents moussants (poudre d'aluminium);
- ceux qui n'ont aucune action sur la réaction d'hydratation: agents entraîneurs d'air, agents colloïdaux, imperméabilisants.

Les deux sous-paragraphe suivants présentent plus précisément les définitions et modes d'action des adjuvants qui sont utilisés dans la fabrication des coulis, à savoir les superplastifiants et les agents colloïdaux qui sont utilisés dans l'étude expérimentale qui va suivre.

- Les superplastifiants

Pour hydrater suffisamment le ciment, il faut un rapport E/C de 0,28 à 0,30 (en masse) [KAROL, 1985]. Le mélange obtenu est alors peu maniable, d'où la nécessité d'un excès d'eau, entraînant une diminution de la résistance mécanique et de la durabilité du coulis. Des fluidifiants, ou superplastifiants, sont alors utilisés pour assurer la dispersion des grains de ciment, donc moins de floculation des grains de ciment et d'emprisonnement d'eau. On a alors une meilleure ouvrabilité du coulis. Ces polycondensés, de forme linéaire en ruban, enveloppent les particules de charges négatives [AÏTCIN, 1989]. L'adsorption du superplastifiant (si il n'est pas modifié chimiquement par des lignosulfonates ou des gluconates) sur les grains de ciment ralentit les réactions d'hydratation, augmente le temps de prise et le temps de développement des résistances [KHAYAT et coll., 1995]. Les superplastifiants sont regroupés en quatre catégories: polymères de mélamine sulfonate, polymères de naphthalène sulfonate, lignosulfonates modifiés, et les autres types.

- Les agents colloïdaux

Les agents colloïdaux sont des polymères solubles dans l'eau:

- polymères naturels (gommes naturelles et amidon);
- polymères semi-synthétiques (amidon décomposé et dérivés);
- polymères synthétiques à base d'éthylène, ou de vinyl.

Leur mode d'action est fonction de leur type et de leur concentration dans le coulis. Les polysaccharides sont des polymères à longues chaînes adhérant à la périphérie des molécules d'eau: ils augmentent ainsi la viscosité de l'eau et permettent aux molécules voisines de développer des forces attractives. L'eau libre est alors bloquée, on a formation d'un gel et

augmentation de la viscosité du coulis. Parallèlement, les agents colloïdaux améliorent le maintien des composants en suspension; ils ont un rôle d'agent anti-lessivage et anti-ressuage. Les coulis ont alors une meilleure pompabilité et sont plus homogènes [KHAYAT, 1995].

La combinaison d'un superplastifiant à un agent colloïdal dans un coulis permet un regain de fluidité, sans affecter la stabilité du mélange. Dans le cas particulier de la gomme Welan, aucun cas d'incompatibilité n'a été relevé avec l'utilisation d'un superplastifiant (mélamine ou naphthalène) à dosage courant.

2.4.2 Rhéologie des coulis de ciment

La plupart des auteurs [LOMBARDI, 1985; DE PAOLI et coll., 1992] s'entendent sur le fait que le modèle rhéologique de Bingham est le plus approprié à représenter le comportement d'un coulis de ciment. Il fait intervenir deux paramètres (Figure 2.5):

- **le seuil de cisaillement ou cohésion τ_0** qui est la force minimale nécessaire à la mise en mouvement du fluide soumis à une contrainte de cisaillement;
- **la viscosité plastique μ_p** qui correspond à la résistance interne du fluide, d'où sa résistance à l'écoulement.

La viscosité apparente μ_a peut également être déterminée pour une valeur du taux de cisaillement donnée. Si un coulis est instable, c'est-à-dire s'il y a séparation des grains de ciment et de l'eau de gâchage, son comportement est imprévisible: soit newtonien, soit binghamien.

Les deux paramètres définis ci-dessus (cohésion et viscosité plastique) influencent clairement la pénétrabilité d'un coulis de ciment dans un milieu lors de son injection. Ainsi, Lombardi (1985) et Hakansson (1992) ont montré que, dans une fissure uniforme:

- la cohésion détermine la distance maximum que peut atteindre le coulis. Soit r le rayon de la fissure cylindrique, p la pression d'injection, la distance parcourue L est telle que

$$L = \frac{p \times r}{2 \times \tau_0} \quad (2.8)$$

- la viscosité plastique détermine le débit et par conséquent le temps nécessaire à l'injection complète;
- la viscosité apparente est relative à un certain taux de cisaillement. À faible taux, elle permet de caractériser le comportement du coulis sous l'effet du processus d'injection. À fort taux de cisaillement, c'est l'effet du pompage qui est simulé.

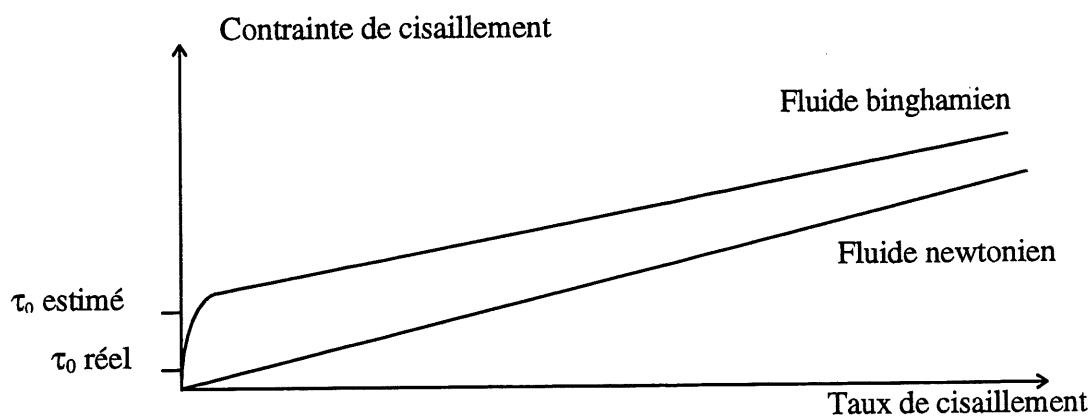
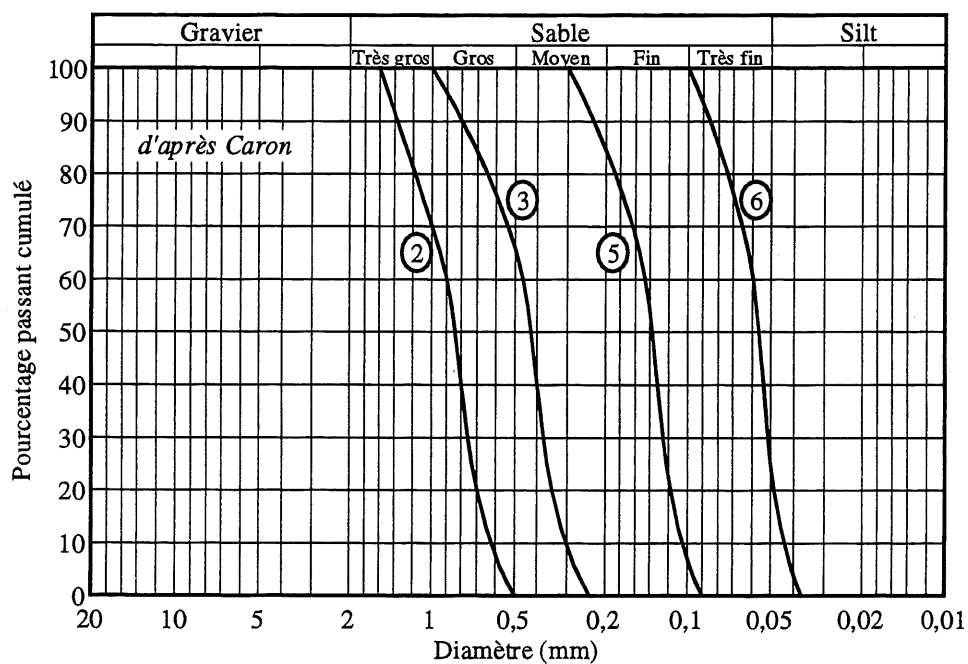
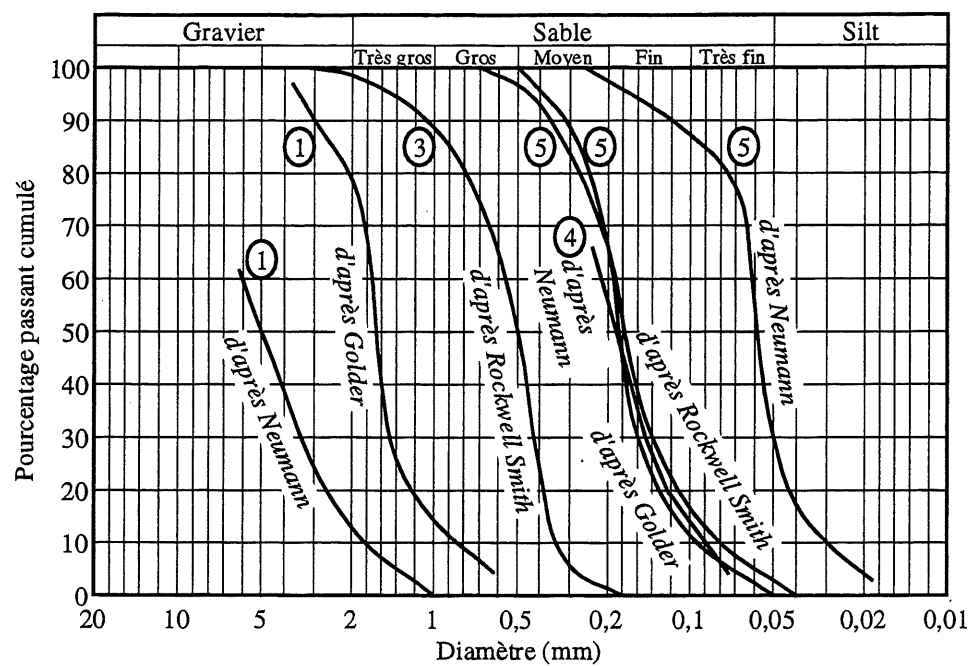


Figure 2.5 Comportement rhéologique d'un coulis

2.5 La pénétrabilité des coulis de ciment dans les sols

2.5.1 Formules d'injectabilité

Il existe une relation entre la dimension des grains du coulis et du milieu pour que l'injection soit possible: elle correspondrait à un cas idéal d'imprégnation parfaite. Dans les années 1960, plusieurs auteurs [CARON, 1963; CAMBEFORT, 1951] définissaient déjà les domaines d'injectabilité de différents produits d'injection relativement à la granulométrie du milieu traité (Figure 2.6).



- | | | |
|-----------------|-------------------|------------------------------|
| ① Ciment | ③ Argile | ⑤ Gel de silice |
| ② Argile-ciment | ④ Procédé Joosten | ⑥ Émulsions de bitume-résine |

Figure 2.6 Limites de pénétrabilité des coulis basées sur la granulométrie du terrain [CAMBEFORT, 1964]

On constate que les produits d'injection à base de ciment et/ou d'argile ne permettaient, à l'époque, que le traitement des graviers et des sables grossiers. Seuls les produits chimiques étaient capables de pénétrer dans des sables moyens à fins, ou encore dans des silts. Le développement des ciments microfins a ensuite permis l'injection de certains de ces terrains à granulométrie plus fine.

L'utilisation de la courbe granulométrique du sol est un moyen simple pour caractériser celui-ci. Cependant, ce paramètre ne tient en aucun cas compte de la compacité du milieu, paramètre influençant de façon non négligeable la pénétrabilité des coulis.

Dans les années 1960, Cambefort (1964) a recherché des paramètres faisant intervenir la dimension des vides du sol, afin de la comparer à celle des grains de ciment. À partir de la formule de Kozeny reliant la perméabilité à l'eau, la porosité du sol et la surface spécifique de ses grains et valable pour des sables grossiers, Cambefort a abouti à une relation entre le diamètre moyen des grains de ciment d_{coulis} et la perméabilité à l'eau k du milieu à injecter:

$$d_{\text{coulis}} < C \times \left(\frac{k}{n} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

avec C : constante;

et n : porosité du milieu.

Ce critère s'est avéré plus intéressant du fait que les perméabilités de différents milieux sont plus facilement comparables que leurs courbes granulométriques. Il est également plus précis puisqu'il tient compte de l'état de compaction du sol. La figure 2.7 considère ce critère dans le cas où la porosité est considérée comme très peu variable.

À titre d'exemple, un coulis d'argile-ciment sera capable de traiter des milieux de perméabilité supérieure à 10^{-2} m/s, son diamètre moyen de particules étant égal à environ 60 microns.

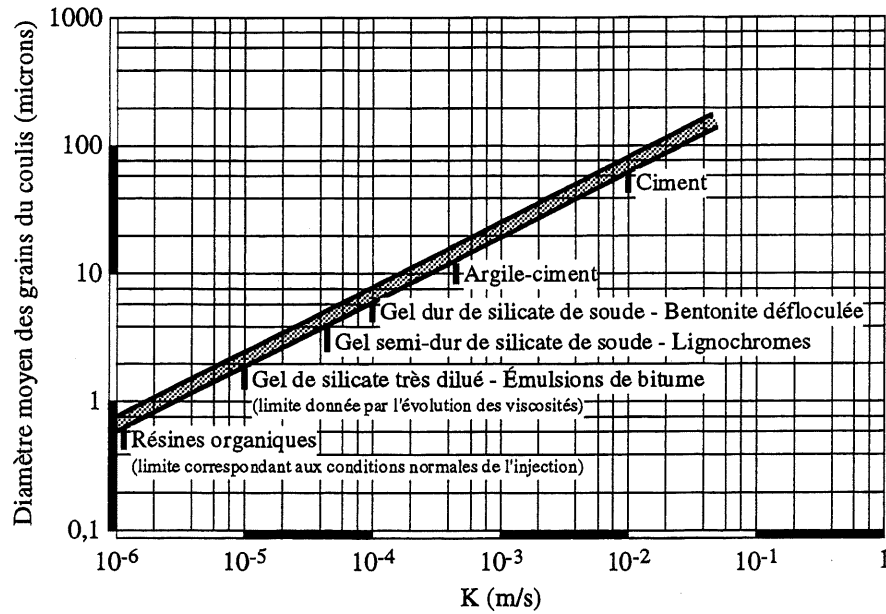


Figure 2.7 Limites de pénétrabilité des coulis basées sur la perméabilité des terrains [CAMBEFORT, 1964]

De Paoli et ses collaborateurs (1992) ont transformé l'équation de Cambefort (éq. 2.9) en remplaçant le diamètre moyen des particules de ciment par le diamètre des grains correspondant à 95% de passant en masse, ils considèrent que la partie grossière du ciment est la plus significative lors de l'injection:

$$d_{95} < C \times \left(\frac{k}{n} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Plus tard, certains auteurs ont relié directement les dimensions des grains de ciment et du sol:

$$(d_{\min})_{\text{sol}} > C \times (d_{\max})_{\text{coulis}} \quad [\text{PAPADAKIS, 1979}] \quad (2.11)$$

avec $10 < C < 20$

$$N = (d_{15})_{\text{sol}} / (d_{85})_{\text{coulis}} \quad [\text{MITCHELL, 1981}] \quad (2.12)$$

avec d_x diamètre des grains (mm) correspondant à x % de passant en masse.

Alors, si $N < 11$: l'injection est impossible
et si $N > 24$: l'injection est possible.

Ces équations sont directement reliées à la loi des filtres utilisée en hydraulique [HOLTZ et coll., 1981]. Dans un arrangement de grains, c'est le diamètre du plus petit interstice qui conditionne le passage des plus gros grains du coulis. L'adaptation des conditions de filtres utilisés par l'U.S Army Corps of Engineers donne, pour une injection de coulis dans un sable, un rapport entre le diamètre des grains de coulis correspondant à 85% de passant et le diamètre des grains de sol correspondant à 15% de passant:

$$(d_{15})_{\text{sol}} / (d_{85})_{\text{coulis}} > 5 \quad [\text{U.S.A.C.E., 1986}] \quad (2.13)$$

Cette dernière équation est moins restrictive que celle proposée par Mitchell (éq. 2.12). Elle correspond à une compacité maximale des grains. En effet, si on considère un milieu uniforme composé de sphères parfaites avec l'assemblage le plus compact possible, on peut démontrer géométriquement que le diamètre du plus petit vide entre les sphères est égal à 0,15 fois le diamètre des sphères.

Cet ordre de grandeur a été repris par Paillère (1990) et Miltiadou (1990): pour qu'un coulis soit injectable, il faut avoir

$$(d_{15})_{\text{sol}} / (d_{85})_{\text{coulis}} > 1,5 \text{ à } 2,5 \quad (2.14)$$

2.5.2 Cas des ciments microfins

Si la relation 2.14 est appliquée au cas de ciments microfins (Spinor A12), on a:

$$(d_{85})_{\text{coulis}} = 7,5 \text{ microns}$$

d'où

$$(d_{15})_{\text{sol}} = 11 \text{ à } 18 \text{ microns}$$

Le coulis serait donc capable de traverser un sol dont le diamètre correspondant à 15% de passant est de 11 à 18 microns.

Or, le tableau 2.3 montre clairement qu'un coulis de ciment microfin comme le Spinor A12 ne peut progresser que dans un sol de diamètre moyen supérieur à 250 microns.

Dans le cas d'un terrain naturel (et non plus d'un sol idéal), les choses sont donc bien différentes puisqu'il faut considérer la granulométrie du sol et sa teneur en eau. Il faut également tenir compte du fait que le coulis peut présenter une floculation de ses grains et un phénomène de ressuage influençant la cinématique de l'écoulement pendant l'injection.

Ainsi, une étude menée par Benhamou (1994) sur des ciments microfins type Spinor, utilisés pour l'injection de coulis dans des sables de Fontainebleau, a permis de définir des limites d'injectabilité selon la composition des coulis:

- il existe une composition optimale des liants microfins par rapport à leurs performances rhéologiques et de pénétrabilité;
- un milieu de perméabilité supérieure à 2×10^{-4} m/s est injectable par un liant microfin tel que $d_{98} = 16 \mu\text{m}$. Un milieu de perméabilité égale à 10^{-4} m/s n'est injectable que si $d_{98}=12 \mu\text{m}$, l'eau doit être à un dosage optimal donnant une dispersion suffisante des grains au sein du coulis, sans qu'il y ait excès d'eau libre.

Pour les coulis concentrés de ciment microfin ($E/C = 0,5$), Viseur (1996) a défini trois critères susceptibles de prévoir leur injectabilité:

- la fluidité;
- la tendance au ressuage;
- l'effet entraîneur d'air éventuel d'un superplastifiant (la phase gazeuse introduite par cet agent dans le coulis va apparaître sous forme de petites bulles d'air pouvant se bloquer dans les petits pores du milieu et ainsi gêner l'avancée du coulis).

Pour les coulis dilués ($E/C=2,0$) la stabilité des coulis est un facteur important vis à vis de leur injection. Fluidité très élevée et essorage ne sont pas sélectifs vis à vis la pénétrabilité [VISEUR, 1996].

2.6 Les techniques d'injection dans les sols

L'étude d'un projet d'injection sur le terrain nécessite tout d'abord de déterminer le patron d'injection (espacement des forages, alignements) puis les techniques d'injection adaptées au site, à sa géologie et fonctions de l'objectif à atteindre. De façon générale, l'injection sur chantier comprend deux grandes phases: la réalisation du forage et l'injection proprement dite. Le fait que les terrains pulvérulents soient plus ou moins meubles ne permet pas l'utilisation des mêmes techniques que dans le cas de l'injection au rocher. Dans les sols, on utilise:

- l'injection en remontant (méthode ascendante);
- l'injection en cours de perforation (méthode descendante);
- l'injection avec tubes à manchettes (procédé Solétanche).

Dans tous les cas, l'expérience des ingénieurs et de l'équipe d'injection est très importante. Chaque projet est un cas particulier.

2.6.1 Méthodes d'injection

Le patron d'injection est déterminé après la réalisation de plots d'essais: selon la progression du coulis dans le milieu, on espace plus ou moins les lignes de forages et les forages [BOWEN, 1975]. Quand un milieu est tel qu'il y a un risque d'effondrement des parois après forage, la technique d'**injection en descendant** est adoptée. Une première passe est forée, en surface ; on installe le dispositif d'injection, c'est-à-dire un obturateur supérieur et le tube central d'injection; on injecte le coulis jusqu'au refus. On remonte alors obturateur et tube. On fore ensuite une deuxième passe en retraversant la première. On l'injecte comme précédemment et on répète les opérations jusqu'à atteindre la profondeur voulue.

Dans des cas moins critiques, on utilise la technique d'**injection en remontant**. Après la réalisation du forage, un tube est battu dans le sol jusqu'à ce qu'il atteigne la base de la zone à traiter. On réalise alors une gaine de coulis plastique autour du tube pour faciliter sa remontée par contre-battage sur un collier et on injecte simultanément, par passes. L'inconvénient de cette

méthode réside dans le fait qu'un manque d'étanchéité peut apparaître au niveau de l'obturateur supérieur puisque la zone sus-jacente à la zone en cours de traitement n'est pas encore étanchée.

Enfin, l'injection avec l'utilisation de tubes à manchettes consiste à réaliser un forage tubé pour retenir le sol environnant. Dès la fin du forage, on remplace le tube par des tubes à manchettes, c'est-à-dire dont les perforations sont enveloppées par des manchettes de caoutchouc. Les pressions d'injection font décoller les manchettes du tube et laissent le coulis se propager.

2.6.2 Espacement des forages

L'espacement entre les lignes de forages et les forages eux-mêmes est fonction de la largeur du rideau à réaliser, de la perméabilité initiale du sol, de son état de saturation et des paramètres d'injection (pression, type de coulis, ...).

On réalise des plots d'essai afin de définir la distance que le coulis sera capable de parcourir dans le sol. L'espacement entre les forages d'une première série (injections primaires) sera au moins deux fois supérieure à cette distance [DEERE, 1976]. On vient ensuite forer et traiter entre les forages primaires (injections secondaires). On continue ainsi en resserrant à chaque série l'espacement des forages jusqu'à obtenir le résultat souhaité. Généralement, on conçoit des patrons d'injection dont les lignes sont espacées de 2 à 3 m [CAMBEFORT, 1964]. Il en est de même pour les forages d'une même ligne, après réalisation des forages primaires et secondaires. Deux méthodes permettent de savoir si le traitement du sol est effectivement terminé:

- soit des essais de perméabilité sont réalisés après chaque série: essais longs et coûteux;
- soit on considère la quantité de coulis que l'on vient d'injecter: la dernière série doit correspondre à une consommation qualifiée de faible à très faible selon Deere (1976) (Tableau 2.4). Cette consommation est bien sûr fonction de l'absorption par le milieu injecté. Lorsque la consommation est assez faible, c'est que le sol est assez bien imprégné pour que le traitement soit arrêté.

TABLEAU 2.4 CONSOMMATION DE COULIS [DEERE, 1976]

Désignation	Consommation (kg/m)
Très forte	> 400
Forte	200-400
Moyennement forte	100-200
Moyenne	50-100
Moyennement faible	25-50
Faible	12,5-25
Très faible	< 12,5

2.6.3 Suivi de l'injection

Lors de l'injection, l'évolution de pressions et de débits peut permettre de détecter des conditions anormales. Ce sont par conséquent des paramètres que l'on suit en continu.

Le mélange injecté en début de travaux est très fluide: le rapport E/C atteint 2,0 à 3,0. Si le débit est moyen et si la pression augmente graduellement, l'injection avec ce même coulis est poursuivie jusqu'à imprégnation totale. Par contre, si le débit de pompage est élevé alors que la pression reste faible, le mélange doit être densifié jusqu'à ce que la pression augmente et que le débit diminue.

L'évolution vers la saturation du sol correspond à une diminution graduelle du débit au fur et à mesure que la pression augmente. Une diminution trop rapide correspondrait à l'injection d'un mélange trop épais. À l'opposé, une augmentation rapide du débit durant le traitement correspondrait à une fracturation hydraulique du milieu [DEERE, 1976].

2.7 Les injections en semi-grandeur

Un moyen pour pouvoir prendre en considération les méthodes d'injection et le suivi de l'injection au cours du temps consiste à simuler un chantier au laboratoire. Il est possible de confectionner des cylindres de grandes dimensions ou de travailler sur des structures en maçonnerie endommagées. Des travaux ont déjà été réalisés, non seulement pour des ciments

[PAILLERE et coll., 1993; SMOAK et coll., 1993] mais aussi pour des coulis chimiques [KAROL, 1990].

L'équipe de Paillère (1993) a travaillé sur des murets en maçonnerie reconstitués en laboratoire et endommagés en compression simple pour créer des fissures. Des coulis ont ensuite été injectés et les murets réparés testés à nouveau en compression. Ceci a permis d'étudier l'injectabilité des coulis et leur adhérence aux matériaux altérés.

Smoak (1993) a réalisé une série de tests pour l'étude de l'effet des superplastifiants dans les coulis d'injection. Il a mis en place une colonne d'injection de 200 mm de diamètre par 1,50 m de hauteur. Celle-ci pouvait être remplie de sable, puis compactée par une table vibrante. L'injection était réalisée par la base à une pression de 68,9 kPa (10 psi).

Chapitre 3

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Introduction

Lors de cette étude, des ciments type 10, 30 et microfin sont étudiés dans le but de formuler des coulis capables de pénétrer et d'étancher des sols fins (de granulométrie 0,160/0,630 mm, soit de perméabilité de 10^{-3} à 10^{-4} m/s). Selon les trois phases définies précédemment, une méthodologie permettant de passer de la caractérisation rhéologique des coulis à des essais d'injection à grande échelle est développée. Ainsi, les résultats obtenus quant à l'injectabilité des coulis ne sont plus limités à des essais à très petite échelle: le terrain qui doit être réellement traité sur chantier est reproduit en laboratoire, en «semi-grandeur».

3.2 Matériaux utilisés

Les mélanges utilisés dans cette phase du projet sont préparés à l'aide de ciments de finesse et de distribution granulométrique variées (Figure 3.1). Ainsi, les ciments type 10, 30 et microfin présentent des finesses respectives de 300, 400 et 1200 m²/kg. Le ciment microfin (Spinor A12) choisi est de base laitier et contient approximativement 80% de laitier, 16% de clinker de ciment Portland et 4% de gypse.

Les ciments type 10, 30 et microfin Spinor A12 sont fournis par la compagnie Ciment St-Laurent.

Un superplastifiant de base naphtalène est incorporé dans chaque mélange [AÏTCIN, 1989] afin de fluidifier les coulis tout en gardant des rapports E/C assez bas (0,5 à 2,0). Son extrait sec et sa densité sont respectivement de 42% et 1,21. L'ajout d'agent colloïdal (gomme Welan) est testé à très haut rapport E/C pour stabiliser les mélanges [KHAYAT et coll., 1995]. Celui choisi est un

polysaccharide microbien à poids moléculaire élevé, préhydraté avec l'eau de gâchage avant l'introduction du ciment.

Les ajouts minéraux utilisés sont au nombre de deux: fumée de silice et bentonite. La fumée de silice est incorporée en substitution au ciment; la bentonite est ajoutée à l'eau de gâchage.

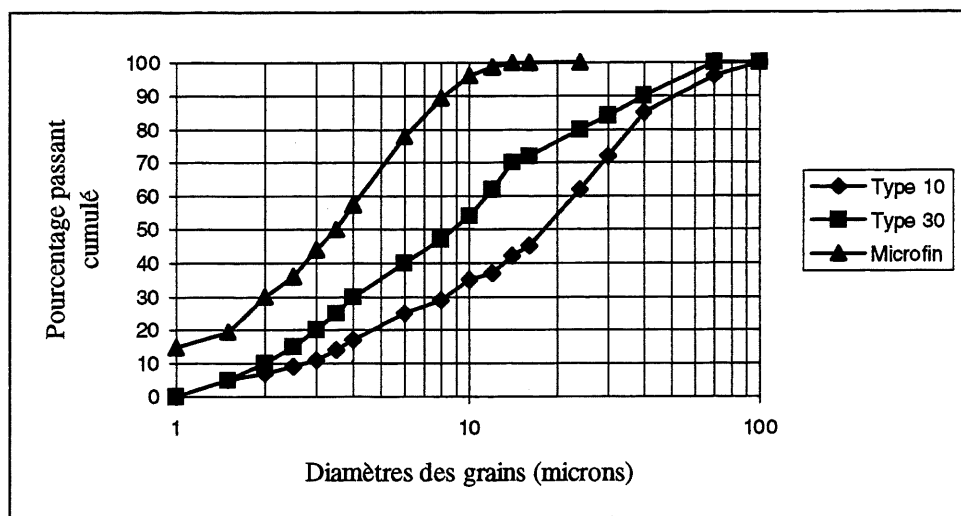


Figure 3.1 Courbes granulométriques des ciments utilisés

Même si le ciment type 30 est un ciment Portland plus fin que les ciments traditionnels, il reste très différent du ciment microfin, que ce soit par sa distribution granulométrique ou par sa composition chimique. Sur le plan granulométrique, le type 30 présente un diamètre moyen de 8 microns alors qu'il n'est que de 3,5 microns pour le ciment microfin type Spinor A12. De même, le diamètre correspondant à 98% de passant (en masse) est de 60 microns pour le type 30 et seulement de 12 microns pour le ciment microfin. Sur le plan des compositions chimiques (Tableau 3.1), la présence de laitier dans le ciment microfin fait que, lors de son hydratation, ce ciment développe moins de portlandite qu'un ciment Portland.

TABLEAU 3.1 COMPOSITION CHIMIQUE DES CIMENTS [MNIF, 1992]

Composants	Type 10 (% massique)	Type 30 (% massique)	Spinor A12 (% massique)
SiO ₂	22	22	31
Al ₂ O ₃	5	5	10
Fe ₂ O ₃	3	2	3
CaO	65	64	47
SO ₃	1.5	3	2
MgO	2	3	7

3.3 Formulation des coulis

Le ciment type 30 St Laurent et le ciment microfin Spinor A12 sont utilisés pour la préparation de quatre coulis à différents rapports E/C: 0,5; 0,6; 1,2 et 2,0. Le superplastifiant (Disal fourni par la compagnie Handy Chemical, Montréal) est ajouté à un dosage de 2,00%, en extrait sec, pour les coulis de rapport E/C de 0,5 et 0,6 et à un dosage de 1,25%, en extrait sec, pour les coulis de rapport E/C de 1,2 et 2,0. Le ciment type 10 St Laurent est testé uniquement à un rapport E/C de 1,2 avec 1,25% de superplastifiant, à des fins de comparaison avec un mélange identique additionné de bentonite. L'agent colloïdal (gomme Welan) n'est ajouté que dans les coulis de rapport E/C de 2,0. Les dosages en agent colloïdal sont de 0,03% de la masse de ciment pour le ciment microfin et de 0,04% de la masse de ciment pour le ciment type 30. Parallèlement, le dosage en superplastifiant, nécessaire pour maintenir la fluidité que l'on a dans les coulis sans agent colloïdal, est augmenté de 1,25 à 2,00% avec l'ajout d'agent. En effet, l'ajout de gomme Welan a tendance à augmenter la viscosité des coulis. De plus, l'agent colloïdal permet une diminution du ressuage forcé: ceci est attribuable à l'augmentation de viscosité de l'eau de gâchage et à l'amélioration de la capacité du coulis à retenir son eau libre [KHAYAT, 1995].

L'effet de la fumée de silice est évalué pour des mélanges fabriqués à partir de ciment type 30, avec des rapports E/C de 0,5; 1,2 et 2,0. Elle est substituée au ciment à un taux de 6% de la masse de ciment. Des études antérieures [BALLIVY et MNIF, 1995] ont indiqué que l'incorporation de fumée de silice n'améliorait pas la stabilité des coulis à base de ciment microfin

fabriqués à un rapport E/C de 0,8 et contenant 1% de superplastifiant. Cette stabilité était évaluée à l'aide d'essais de ressuage statique et forcé.

Enfin, la bentonite est incorporée dans les coulis à rapport E/C de 1,2 pour les ciments Portland type 10 et 30 et pour le ciment microfin. Elle est ajoutée à l'eau de gâchage (à raison de 2% de la masse d'eau) 24 heures avant la fabrication des coulis de façon à ce que les particules d'argile gonflent et assurent la stabilisation des coulis après leur fabrication. Toutes les compositions étudiées se trouvent résumées dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 FORMULATION DES COULIS TESTÉS

Ciment	E/C (en masse)	Superplastifiant (% massique)	Agent colloïdal (% massique)	Fumée de silice (% substitué)	Bentonite (% massique)
Type 10	1,2	1,25	---	---	---
	1,2	1,25	---	---	---
Type 30	0,5	2,00	---	---	---
	0,5	2,00	---	6	---
	0,6	2,00	---	---	---
	1,2	1,25	---	---	---
	1,2	1,25	---	6	---
	1,2	1,55	---	---	2
	2,0	1,25	---	---	---
	2,0	2,00	0,04	---	---
	2,0	1,25	---	6	---
Microfin	0,5	2,00	---	---	---
	0,6	2,00	---	---	---
	1,2	1,25	---	---	---
	1,2	1,55	---	---	2
	2,0	1,25	---	---	---
	2,0	2,00	0,03	---	---

3.4 Mode de malaxage et essais sur coulis

Les composants des coulis sont mélangés avec un malaxeur à hélice muni d'une tête défloculeuse de 7 cm de diamètre (vitesse de rotation 2500 tours/minute, durée de malaxage 10 mn). La procédure de malaxage est décrite sur l'organigramme de la figure 3.2. Cette séquence de malaxage a été sélectionnée afin d'optimiser les performances des coulis et est en accord avec les

recherches de Allan et Kukacka (1996). Dès la fin du mélange, on commence les essais de caractérisation rhéologique.

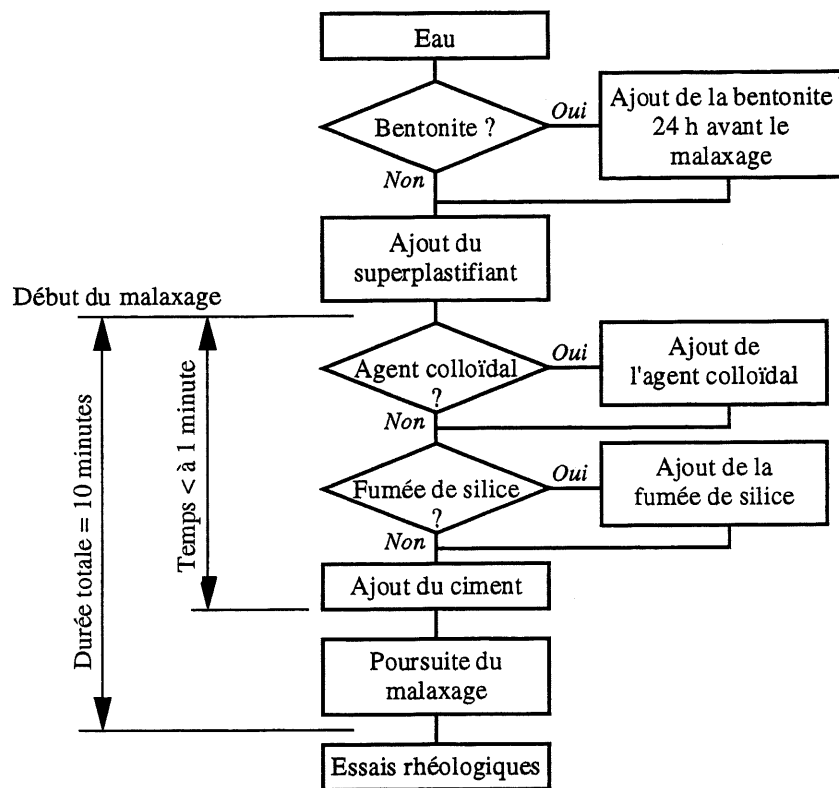


Figure 3.2 Séquence de malaxage des coulis d'injection

3.4.1 Caractérisation de la fluidité et de l'ouvrabilité des coulis

a) Essai d'écoulement au cône Marsh

Il consiste à mesurer le temps d'écoulement du coulis à travers un cône de dimensions et de caractéristiques déterminées (ajutage de 4,76 mm, capacité de 1 200 ml de coulis). Ce temps est fonction de la viscosité du coulis (norme ASTM C939). La valeur retenue sera le temps d'écoulement pour 700 ml de coulis, généralement moins affectée par la variation de charge (Figure 3.3). À titre de référence, pour de l'eau à 20°C, le temps d'écoulement de 700 ml est d'environ $22,5 \pm 0,5$ s [Laboratoire de mécanique des roches, 1994].

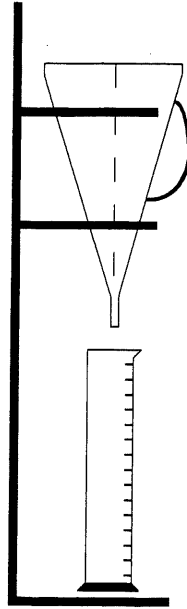


Figure 3.3 Montage de l'essai d'écoulement au cône Marsh

b) Essai d'affaissement au mini-cône

Il s'agit de mesurer l'étalement d'un certain volume de coulis placé dans un mini-cône (dimensions standards selon la norme ASTM C-143), sur une plaque de plexiglas (Figure 3.4). On mesure le diamètre d'étalement. Il existe une corrélation entre l'affaissement du coulis et son seuil de cisaillement. Cet essai permet également d'étudier l'évolution de la maniabilité du coulis en fonction du temps.

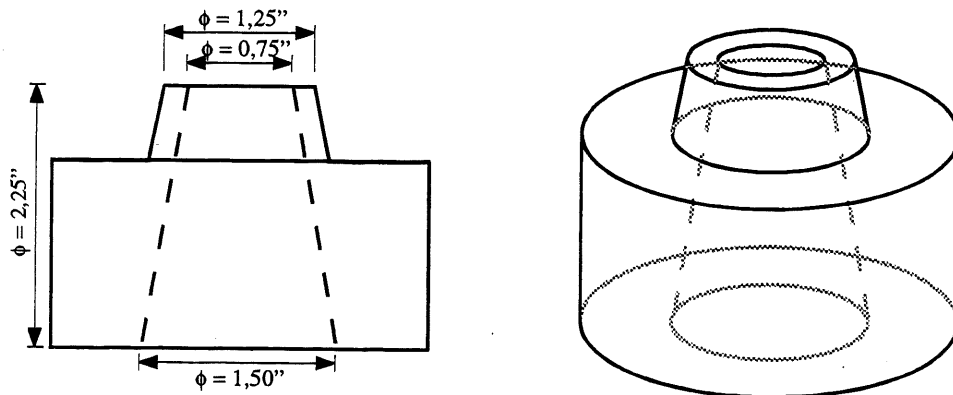


Figure 3.4 Mini-cône d'affaissement

c) Essai de mesure de viscosité au rhéomètre

Un viscosimètre rotatif à cylindres coaxiaux (Chan 35) permet de mesurer les viscosités apparente et plastique des coulis ainsi que leur seuil de cisaillement. Cet appareil comporte 12 vitesses de rotation. Le coulis est placé entre les deux cylindres et exerce une force de frottement qui se traduit par un moment de cisaillement proportionnel à sa viscosité, aux dimensions des cylindres et au taux de cisaillement déduit de la vitesse de rotation. Pour chaque vitesse, la lecture est prise après 20 s de rotation et ceci dans l'ordre croissant des vitesses.

3.4.2 Caractérisation de la stabilité des coulis

a) Essai de ressuage forcé (filtre presse Baroïd)

Une pression de 550 kPa (80 psi) est appliquée sur un volume de coulis donné (200 ml) placé dans une enceinte fermée (Figure 3.5). Un filtre placé à la base de l'enceinte permet le passage d'une partie de l'eau contenue dans le coulis et retient les grains de liant [Laboratoire de mécanique des roches, 1994].

On mesure la quantité de filtrat (exprimée en pourcentage de la quantité d'eau initialement contenue dans le coulis) recueilli au cours du temps (jusqu'à 30 minutes). Ce phénomène de filtration sous l'effet de la pression peut apparaître lors d'une injection sur chantier.

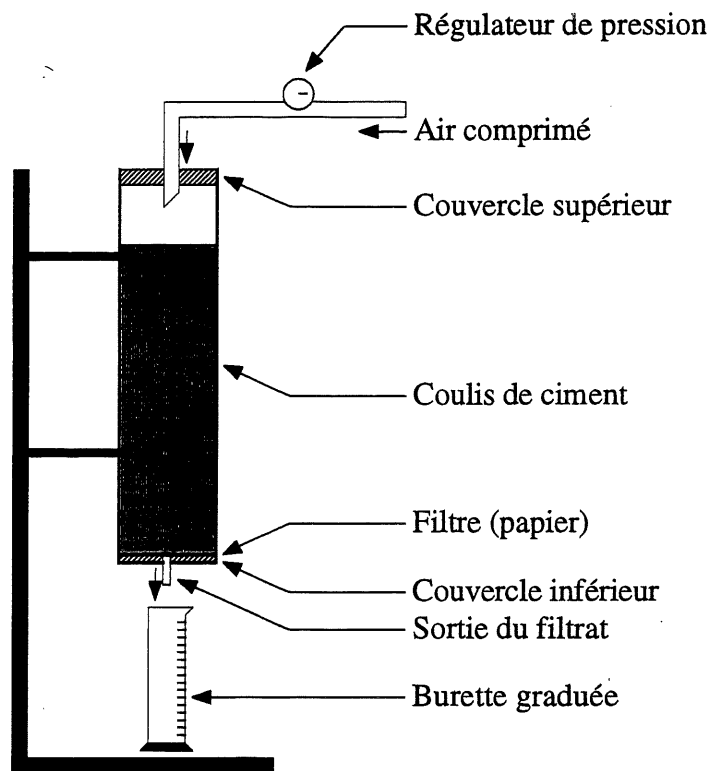


Figure 3.5 Montage de l'essai de ressuage forcé

b) Essai de ressuage statique

Cet essai, décrit par la norme ASTM C-940-87, consiste à placer 500 ml de coulis dans un cylindre gradué et à le laisser au repos afin d'observer, au cours du temps, d'éventuels phénomènes de sédimentation ou de ressuage d'eau en surface. Ce phénomène peut se produire après injection du coulis dans les pores du sol. Un coulis est considéré comme stable si, après deux heures d'essai, il présente moins de 5% de ressuage.

3.4.3 Caractérisation de l'injectabilité des coulis

L'aptitude d'un coulis à pénétrer un sol est testée selon la norme européenne NF P18-891 (1986). Le dispositif de base (Figure 3.6) comporte un réservoir métallique pour le coulis à

injecter, un support pour les colonnes reliées au réservoir par des flexibles et une éprouvette graduée recueillant le trop plein de coulis injecté. Un manomètre permet de régler la pression d'injection à 76 kPa (11 psi). La norme impose un sable de granulométrie 0,630/1,25 mm (à courbe granulométrique linéaire) et le test peut s'effectuer sur un sable sec ou humide. Le mode de mise en place est également normalisé. Dans le cadre de cette étude, la fraction granulométrique utilisée est prise entre 0,160 et 0,630 mm (par tamisage d'un sable d'Ottawa type C109) et le mode de remplissage des colonnes est modifié. La courbe granulométrique de ce sable est présentée à la figure 3.7: son allure générale s'approche de celle du sable normalisé, mais les grains sont bien sûr plus fins. Tous les essais sont effectués sur un sable saturé: avant l'injection de coulis, de l'eau est injectée à travers le sable afin de le saturer et permet parallèlement de déterminer une approximation de la perméabilité du sable (environ 5×10^{-4} m/s dans le cas du sable 0,160 / 0,630 mm). Lors de l'injection du coulis, on mesure la hauteur atteinte dans la colonne et la durée nécessaire à cette propagation.

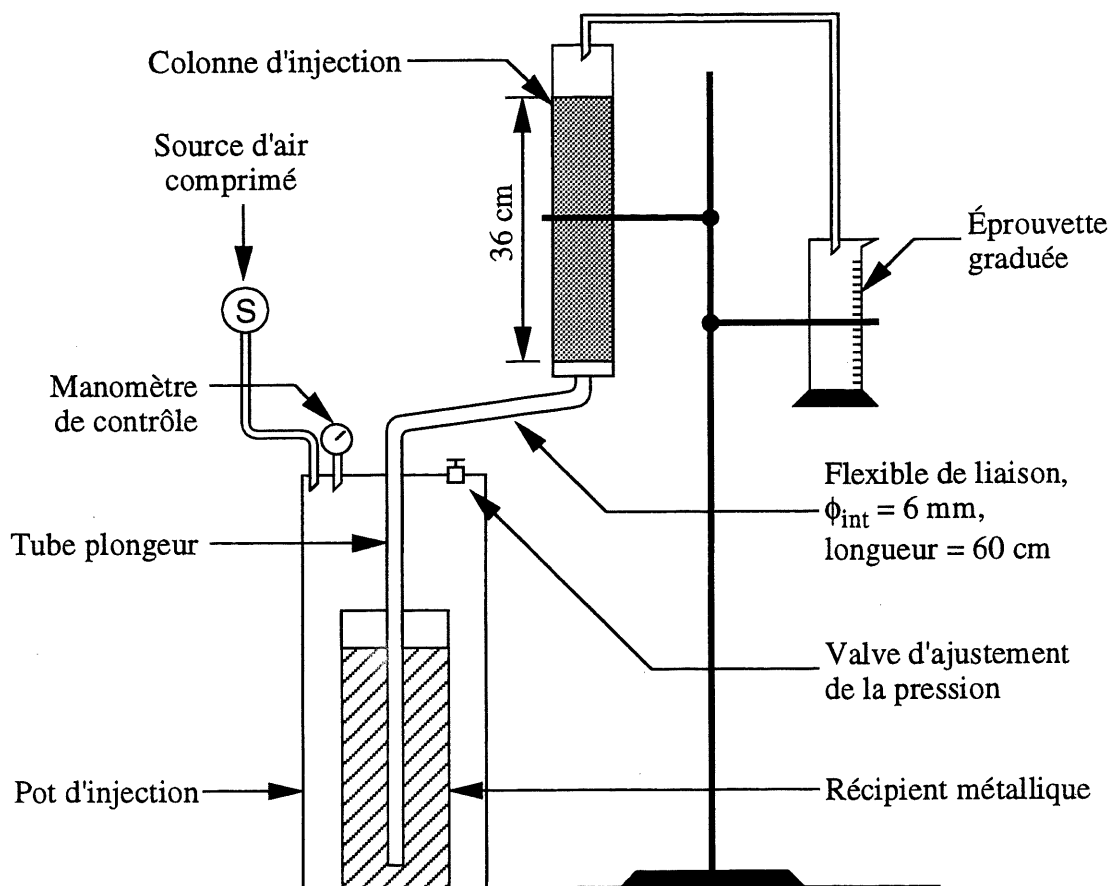


Figure 3.6 Montage de l'essai d'injectabilité à la colonne de sable [NF P18-891]

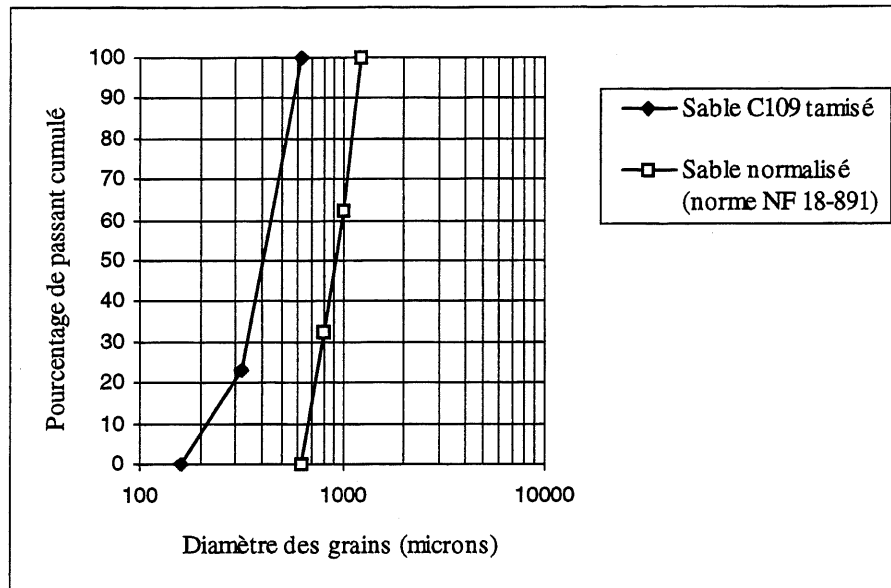


Figure 3.7 Courbe granulométrique du sable utilisé pour les essais d'injection à la colonne

3.5 Essais de perméabilité à l'eau

Pour tester l'injectabilité des coulis, ce sont des colonnes de 22 mm de diamètre qui sont utilisées. Pour réaliser des essais de perméabilité, les perméamètres disponibles à l'Université de Sherbrooke possèdent une base de 50 mm de diamètre. Il faut donc changer de type de colonne, d'où l'utilisation de colonnes de plexiglas normalisées de 47 mm de diamètre et 36 cm de hauteur. L'essai est ainsi pratiqué, conformément à la norme ASTM D 5084, sur des échantillons de 47 mm de diamètre et environ 55 mm de hauteur.

3.5.1 Mise en place du sable dans les colonnes

Le problème principal de la mise en place du sable dans les colonnes réside dans l'obtention d'une densité et donc d'une perméabilité à l'eau identique à celle obtenue dans les colonnes installées pour les essais d'injectabilité selon la norme NF P18-891. Le même sable d'Ottawa type C109, tamisé à 0,16/0,63 mm, est utilisé pour remplir les colonnes de 47 mm de diamètre. Un mode de mise en place est défini par essais-erreurs (variation du nombre de couches de sable, du nombre de coups par couche) pour permettre d'atteindre la compaction souhaitée et identique au cas des colonnes de 22 mm de diamètre.

La reproductibilité de cette procédure est un paramètre important rendant pertinente la comparaison des résultats obtenus pour les différents coulis. Cette reproductibilité est basée sur le travail d'un opérateur qui doit, par conséquent, être le même pour tous les essais d'injection réalisés.

3.5.2 Perméabilité des sables avant injection

Il est évident que pour connaître l'efficacité de l'injection d'un coulis dans un sol, il faut tout d'abord connaître la perméabilité à l'eau initiale de celui-ci, une fois en place dans la colonne.

Pour cela, étant donné que l'on considère dans cette étude des sables saturés, la saturation des colonnes est un moyen de quantifier le gain d'étanchéité du sol apporté par l'injection. En effet, pendant la saturation, connaissant la pression d'injection de l'eau, la section et la hauteur de la colonne injectée, et en se fixant un volume d'eau traversant la colonne, on peut calculer une approximation de la perméabilité à l'eau du sable en place. On parle ici d'approximation dans le sens où la perméabilité à l'eau, qui est mesurée sur le sable après injection et durcissement du coulis, ne l'est pas dans les mêmes conditions. On utilise dans ce dernier cas un perméamètre.

La perméabilité initiale à l'eau du sable est déterminée par injection d'eau sous une pression de 50 kPa, à la base de la colonne. On calcule alors K de la façon suivante:

$$K = \frac{Q}{(A \times i)} \quad (3.1)$$

avec K: perméabilité à l'eau (cm/s);

Q: débit d'eau injectée à travers la section A de la colonne;

$$A = \pi \times (\text{rayon de la colonne})^2 \quad (3.2)$$

$$A = \pi \times (23.5 \times 10^{-3})^2$$

$$A = 1.73 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

i: gradient hydraulique

$$i = \frac{h}{l} \quad (3.3)$$

avec l: hauteur de sable injectée par l'eau

$$l = 0.36 \text{ m}$$

h: hauteur piézométrique de l'eau

$$h = 100 \times \text{pression d'injection}$$

$$h = 100 \times 0.050 \text{ MPa} = 5 \text{ m d'eau}$$

Q est évalué à partir du temps t nécessaire au remplissage d'une éprouvette de 100 ml (soit 10^{-4} m^3) à la sortie de la colonne:

$$Q = \frac{100 \text{ ml}}{\text{temps de remplissage}}$$
$$\text{donc } K = \frac{10^{-4}}{\left(t \times 1.73 \times 10^{-3} \times \frac{10}{0.36} \right)}$$

c'est-à-dire

$$K = \frac{1}{(233.7 \times t)} \quad (3.4)$$

Cette mesure est réalisée pour chaque colonne fabriquée et permet ainsi de vérifier que le milieu traité est sensiblement le même pour chaque essai.

3.5.3 Perméabilité après injection

Une fois que le coulis sélectionné est injecté à travers le sable d'une colonne de 47 mm de diamètre et qu'il parcourt de part en part les 36 cm de hauteur de celle-ci, le mortier obtenu après durcissement du coulis est conservé dans des conditions favorables de mûrissement, soit dans de l'eau saturée en chaux. À un âge donné du mortier, on prélève des échantillons de la colonne (à la base et au sommet de celle-ci) et on procède à des essais de perméabilité à l'eau. Comme souligné au deuxième chapitre, la conductivité hydraulique d'un sol définit comment l'eau circule à travers

celui-ci. C'est un essai à charge constante qui est utilisé: on impose un différentiel de pression entre l'entrée et la sortie de l'échantillon [NIEMANTS, 1981].

a) Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé comporte six cellules de perméabilité pouvant fonctionner simultanément ou indépendamment les unes des autres (Figure 3.8).

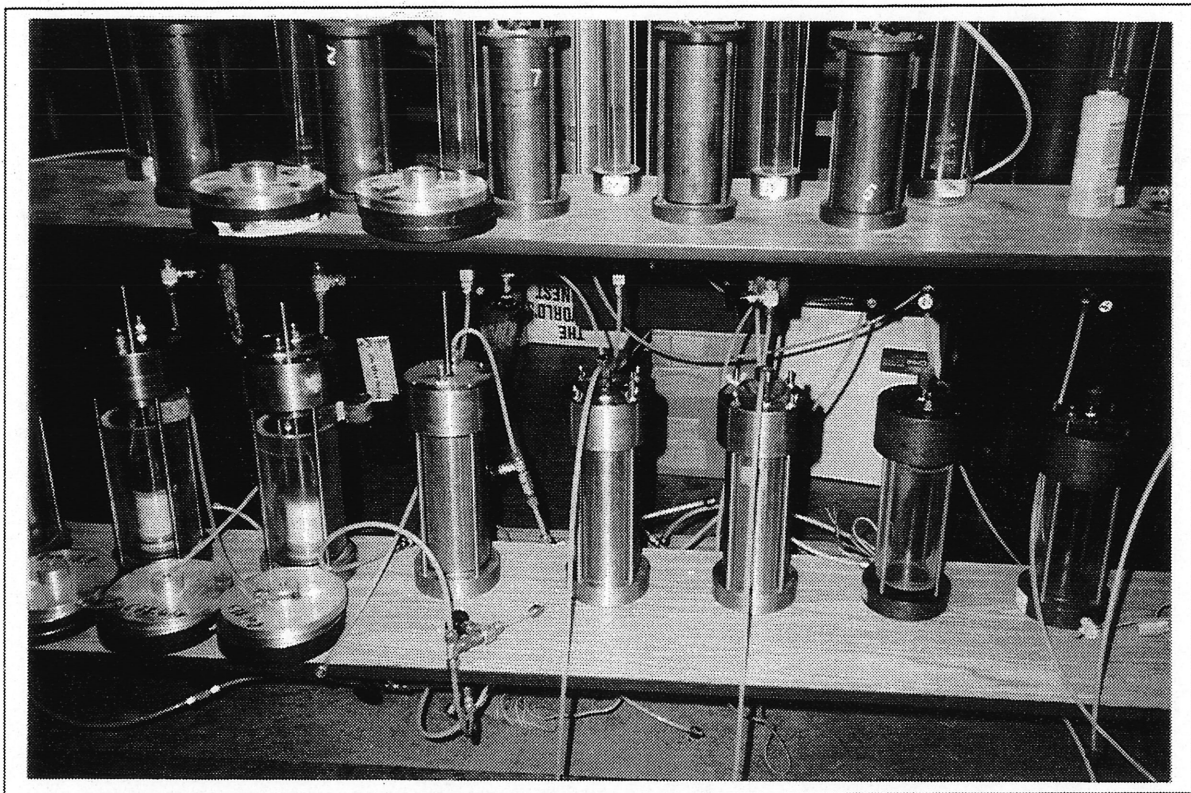


Figure 3.8 Vue globale du dispositif des perméamètres

Chaque cellule comprend:

- une base inférieure en laiton à laquelle sont fixées quatre tiges d'acier assurant la fermeture par la base supérieure;

- une base supérieure en laiton également et possédant un orifice d'évacuation d'eau vers les burettes de lecture et un orifice d'entrée d'eau assurant la saturation de l'enceinte et donc la pression extérieure sur l'échantillon;
- une enceinte de plexiglas ou en laiton où se trouve l'échantillon;
- une membrane de caoutchouc enveloppant l'échantillon;
- des plateaux de contrepoids agissant contre la pression de soulèvement exercée par l'eau sous pression dans l'échantillon.

Reliés aux cellules, on a également un réservoir d'eau, une source de pression (bouteilles d'azote), des régulateurs de pression, des burettes permettant de lire les variations de la hauteur d'eau pour chaque cellule au cours de l'essai (Figure 3.9).

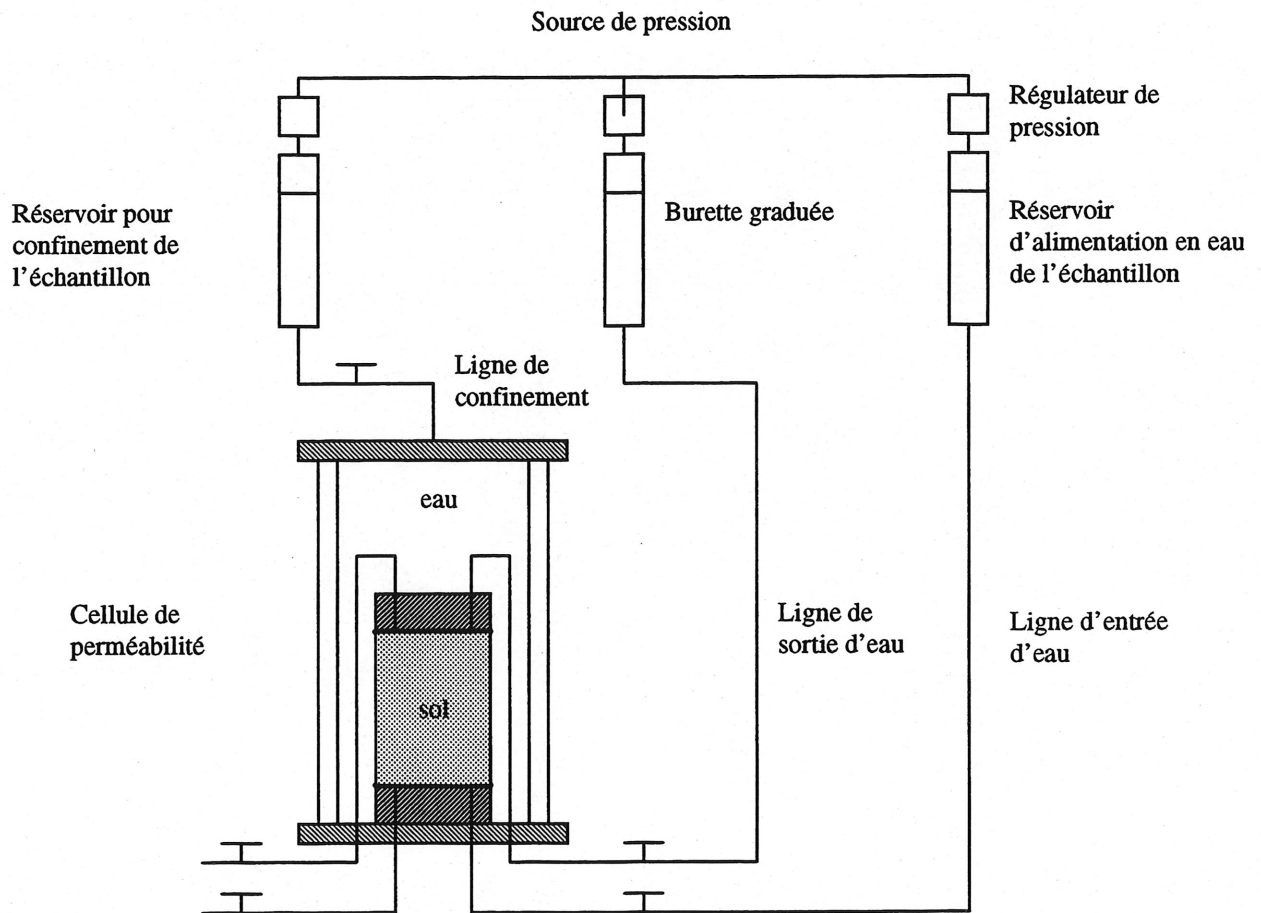


Figure 3.9 Cellule individuelle du perméamètre

Les échantillons cylindriques de mortier sont prélevés dans les colonnes de 47 mm de diamètre, par sciage à la scie au diamant (Norme ASTM D5084). Chacun d'entre eux a une hauteur d'environ 55 mm. Avant d'être introduit dans une cellule du perméamètre, le cylindre de mortier est placé entre deux pierres poreuses de même diamètre que l'échantillon. Un filtre de papier est intercalé entre chaque pierre et le cylindre de mortier. Une membrane de caoutchouc est alors mise en place autour de l'échantillon. Elle doit être plaquée à celui-ci et laisser ses extrémités libres. L'échantillon est déposé sur la base inférieure du perméamètre et la membrane fixée à celle-ci par un joint d'étanchéité. On met enfin en place la cellule, que l'on remplit d'eau, puis la base supérieure (Figure 3.10).

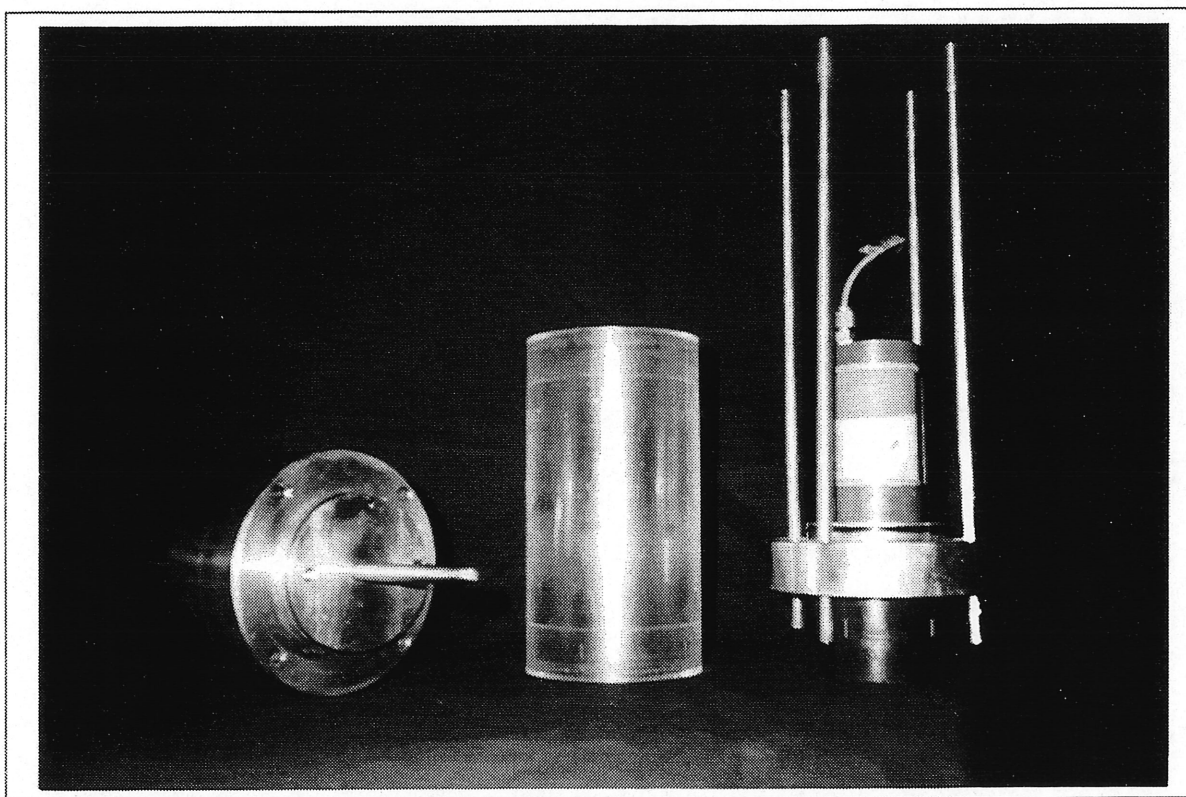


Figure 3.10 Composants d'une cellule du perméamètre

b) Saturation de l'échantillon

L'air est chassé de l'échantillon puis une pression de confinement est appliquée dans la cellule, tout autour de l'échantillon, par l'intermédiaire de l'eau contenue dans la cellule. On crée ensuite une contre pression en jouant sur la pression de confinement et les pressions d'entrée et de sortie d'eau de l'échantillon. On sature ainsi le cylindre de mortier. Cette contre pression a également pour effet de limiter l'influence des bulles d'air éventuelles qui, malgré une procédure stricte, peuvent rester emprisonnées: elle permet leur dissolution dans l'eau.

c) Mesure de la perméabilité

Pour la mesure proprement dite de la perméabilité à l'eau du mortier obtenue après injection, on applique un gradient hydraulique dans l'échantillon. La norme ASTM D 5084 stipule que, pour une conductivité hydraulique de 10^4 à 10^5 m/s, le gradient à appliquer doit être au maximum de 20. Il faut savoir que, si le gradient utilisé est trop faible, l'essai sera très long. Au contraire, si le gradient est trop élevé, il y a un risque de lessivage de l'échantillon: des particules peuvent lui être arrachées et peuvent colmater le dispositif. La différence de pression (ou hauteur d'eau à appliquer Δh) pour créer ce gradient est fonction de la longueur L de l'échantillon:

$$grad = \frac{\Delta h}{L}$$
$$\Delta h = L \times grad \quad (3.5)$$

Si on constate que le gradient choisi ne convient pas au cas traité, il peut être ajusté pour les essais ultérieurs.

On considère ici une mesure de perméabilité à l'eau par des essais à charge constante. On mesure périodiquement la quantité d'eau entrant et sortant de l'échantillon. L'essai se termine lorsque l'on constate que le tracé graphique de la perméabilité à l'eau en fonction du temps ne montre plus de variations importantes. La conductivité hydraulique est alors calculée comme suit:

$$K = \frac{QL}{Ath} \quad (3.6)$$

avec Q: débit de sortie de l'échantillon, m³;

L: longueur de l'échantillon, m;

A: section de l'échantillon, m²;

t: intervalle de temps entre deux mesures correspondant au débit Q;

h: différence de hauteur d'eau entre le niveau de la colonne d'eau et celui de la burette, m.

La perméabilité initiale des échantillons avant injection étant d'environ 10⁻⁴m/s, on s'attend à obtenir des perméabilités après injection de l'ordre de 10⁻⁶ à 10⁻⁷ m/s après traitement par un coulis d'injection.

3.6 Injection en semi-grandeur

Les conditions rencontrées sur le terrain sont rarement aussi idéales que celles préconisées par les essais d'injection à la colonne de sable. Il serait donc intéressant de passer à une échelle encore supérieure et de simuler des injections telles qu'elles sont pratiquées sur les chantiers.

Deux types d'essais sont donc pratiqués:

- l'un simule un sol «homogène»;
- l'autre simule un sol bicouche avec deux classes granulométriques en couches superposées.

3.6.1 Matériaux

Les petites colonnes de 22 mm de diamètre et 36 cm de longueur deviennent, dans cette phase du projet, des cylindres de 51 cm de diamètre et 1,22 m de hauteur.

a) Coulis sélectionnés

Pour cette dernière phase du programme expérimental, une sélection de coulis est faite afin d'obtenir une propagation observable du mélange à travers le sable du cylindre: si les coulis ne présentent pas un minimum de pénétrabilité dans le sol, aucun essai de caractérisation du mortier après injection ne peut être réalisé.

Les meilleurs coulis définis au cours des deux premières phases sont retenus. Il est possible, durant l'essai de procéder à l'injection, dans un premier temps, d'un coulis à rapport $E/C > 1,0$ puis, dans un deuxième temps, à celle d'un coulis plus visqueux ($E/C < 1,0$).

b) Choix du sable à injecter

Le cylindre conçu pour cette phase du programme permet de travailler sur un volume d'environ $0,25 \text{ m}^3$ de sol. Il est donc inconcevable d'utiliser un sable comme le sable d'Ottawa pour ce type d'essais. Le coût en serait beaucoup trop élevé. Il a été décidé d'opérer avec un sable naturel, le sable Aimé Coté. Sa granulométrie s'étend de 0,080 à 5 mm (Figure 3.11).

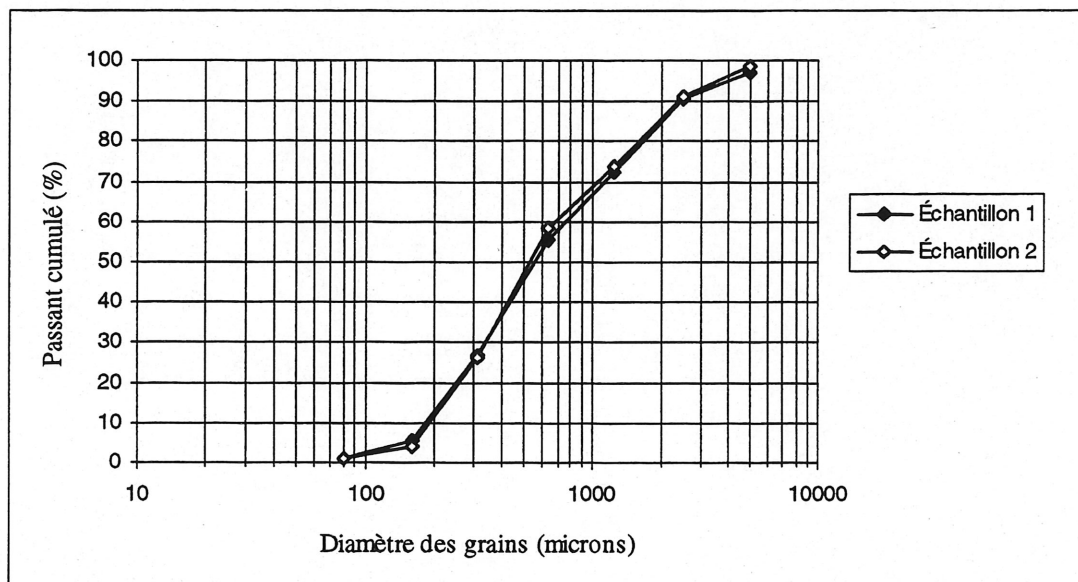


Figure 3.11 Courbes granulométriques de deux échantillons de sable Aimé Coté

Par rapport au sable d'Ottawa, le sable Aimé Coté a une granulométrie plus étalée et on peut donc penser, qu'à compacité égale, il est relativement moins poreux que ce dernier. Une mesure de la masse volumique sèche des deux matériaux dans les mêmes conditions de compacité montre que l'on a, pour les deux sables, une valeur de $1,75$ à $1,80 \text{ g/cm}^3$. Avant toute utilisation, le sable Aimé Coté est séché de façon à pouvoir lui donner la teneur en eau souhaitée juste avant l'injection.

En ce qui concerne les injections dans un sol bicouche, un tamisage du sable Aimé Coté a été réalisé afin d'obtenir deux fractions granulométriques:

- fraction fine: $0,080 / 0,630 \text{ mm}$;
- fraction grossière: $0,630 / 2,5 \text{ mm}$.

3.6.2 Dispositif d'injection

Le système d'injection utilisé est comparable à celui que l'on peut rencontrer sur un chantier.

a) Cylindre d'injection

Il a été conçu à partir d'une feuille d'acier assez épaisse jouant le rôle de colonne. La base a été fabriquée dans une plaque de plexiglas d'environ $1,5 \text{ cm}$ d'épaisseur et sur laquelle vient s'encaster un tube d'injection creux en laiton (Figure 3.12).

Le cylindre présente un diamètre de 51 cm et une hauteur d'environ $1,22 \text{ m}$. Pour des raisons de facilité de démoulage, il a été fabriqué en deux demi-cylindres. Ceux-ci sont boulonnés l'un à l'autre et séparés par des joints d'étanchéité afin d'assurer l'absence de fuites latérales d'eau ou de coulis durant l'injection et pendant le durcissement du coulis. Durant l'injection, le cylindre n'a pas été muni de son couvercle.

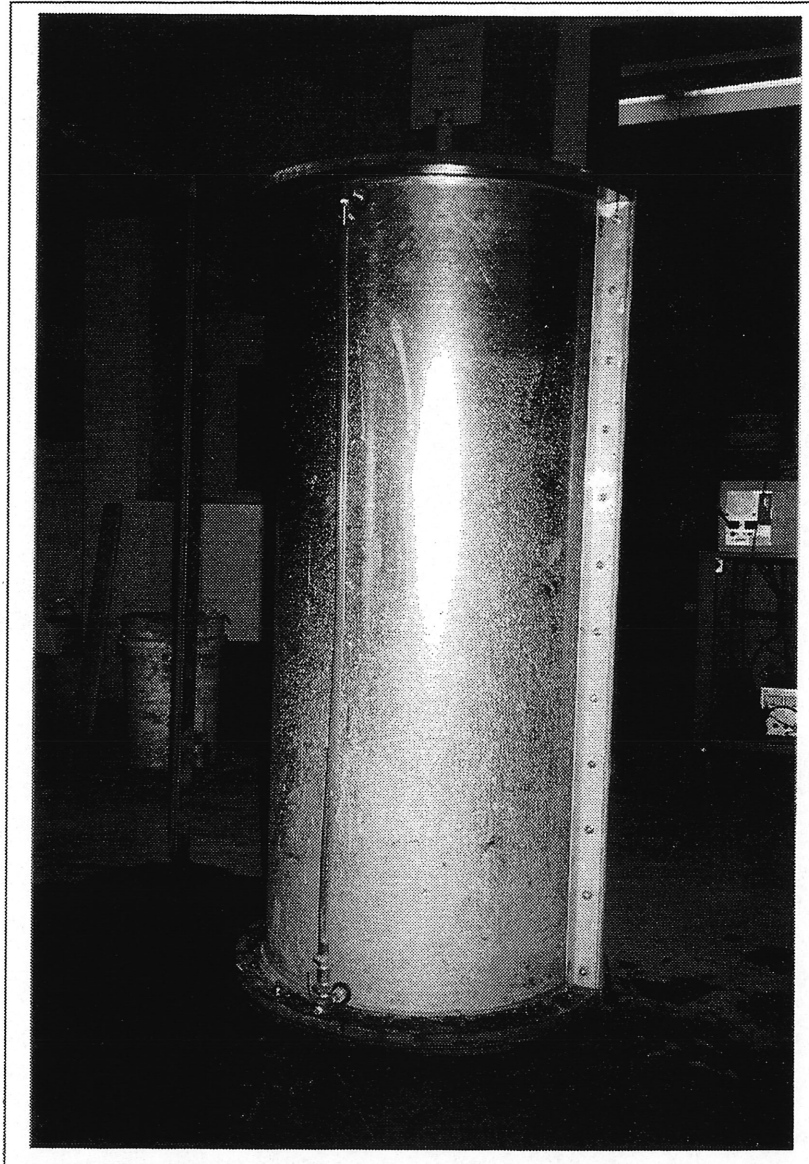


Figure 3.12 Cylindre d'injection

Le tube d'injection est composé de deux éléments:

- un tube encastré sur la base de plexiglas du cylindre, d'un diamètre d'environ 25 mm. Le long de ce tube, on a perforé, à chaque 30 cm, quatre orifices disposés symétriquement sur la circonférence du tube. Ils permettent le passage du coulis de l'intérieur du tube vers le sable. De plus, de façon à ce que les grains de sable ne pénètrent pas dans le tube et ne l'obturent pas, ces quatre orifices sont recouverts d'un filtre métallique à maille suffisamment serrée;

- un tube d'injection du coulis, d'un diamètre de 5 mm, ce tube possède à son extrémité un obturateur mécanique. Le tube est descendu dans le tube central encastré sur la base. L'autre extrémité du tube est reliée au réservoir de coulis. Durant l'injection, ce dernier traverse donc le tube, remplit la zone située sous l'obturateur et progresse vers les quatre orifices d'injection (Figure 3.13). L'injection est pratiquée par passes ascendantes, à chacun des trois niveaux d'orifices.

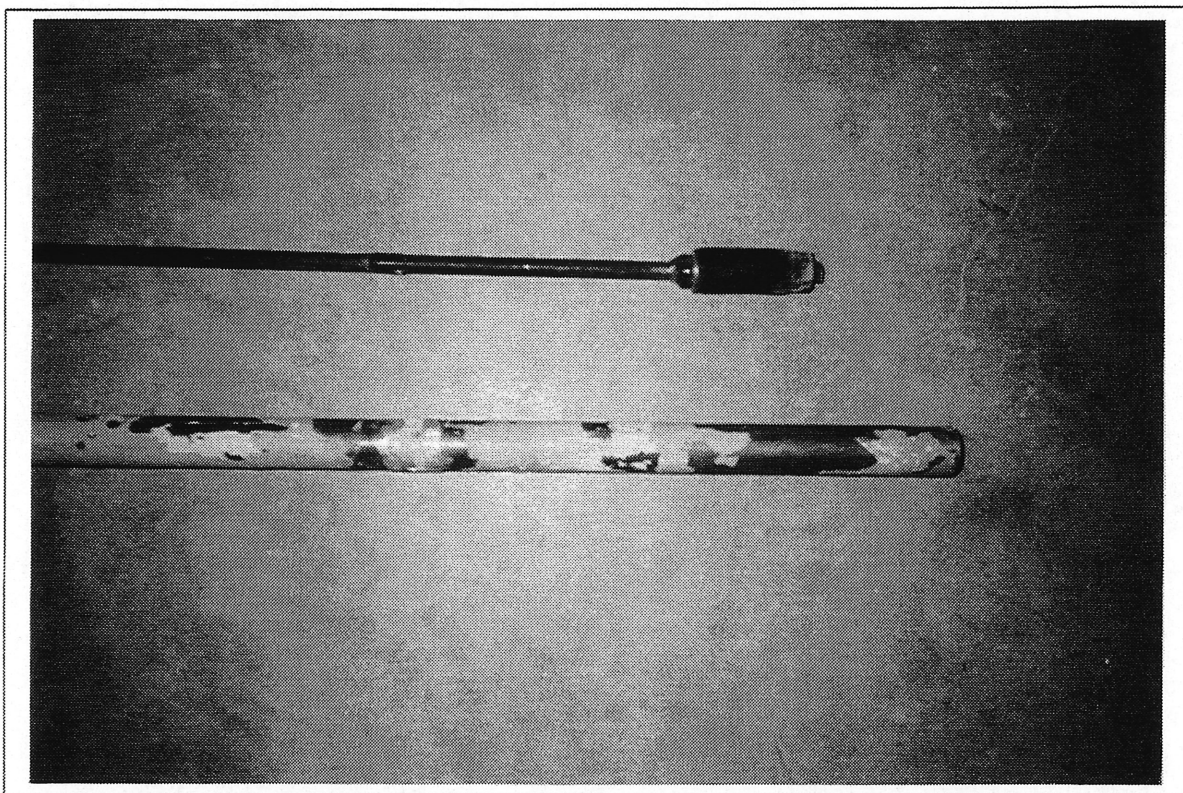


Figure 3.13 Tubes d'injection

b) Circuit d'injection

Avant de parvenir au cylindre, le coulis doit être fabriqué et acheminé à partir de son réservoir. Le malaxage des divers composants du mélange à injecter est assuré par une hélice à arbre vertical, dans un réservoir d'une capacité de 40 à 50 litres. Cette phase de préparation est d'environ 5 minutes de malaxage à 1500 - 2000 tours par minutes (Figure 3.14). Ensuite, le coulis

est pompé du réservoir vers les tuyaux d'amenée. La pompe utilisée est une pompe type Moynot dont le débit est réglé par l'opérateur en fonction de l'évolution de l'injection. Les tuyaux reliant la pompe au tube d'injection comprennent deux sections de 3,75 m de longueur pour 25 mm de diamètre puis d'une troisième section de 5,60 m pour 12 mm de diamètre.

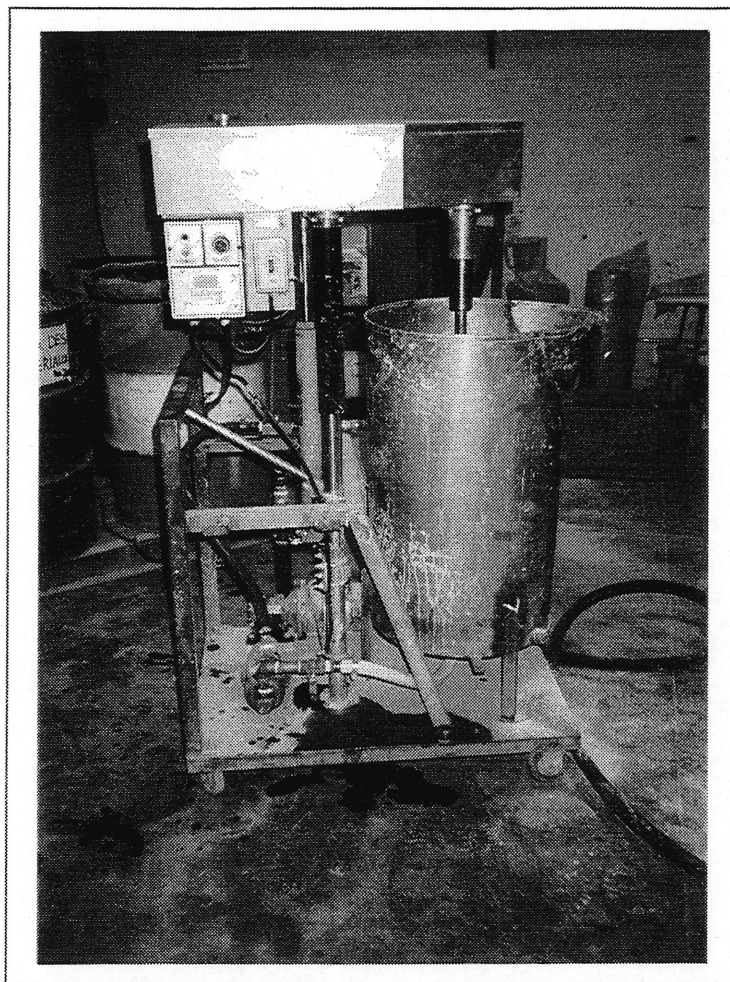


Figure 3.14 Réservoir de coulis et pompe à injection

3.6.3 Suivi de l'injection

Comme lors de l'injection dans un sol, sur chantier, le résultat du traitement du sable du cylindre par le coulis n'est pas observable pendant l'essai. De plus, étant donné les longueurs assez importantes de tubages d'amenée du coulis, les pertes de charges sont importantes: la pression d'injection indiquée au niveau de la pompe est donc supérieure à celle à l'entrée du tube d'injection.

Pour ces raisons, durant les essais, on procède au suivi usuel:

- de la pression à l'entrée du cylindre, grâce à un capteur de pression;
- du débit d'injection, par calcul du volume de coulis absorbé.

a) Suivi des débits et pressions d'injection

Ce suivi est assuré par un capteur piézoélectrique placé à l'entrée du tube d'injection. Relié à un système d'acquisition enregistrant la pression toutes les secondes, ce capteur de pression permet le tracé en continu de la courbe pression d'injection vs temps, pendant toute la durée de l'essai.

Le débit d'injection est obtenu par le suivi du volume de coulis injecté au cours du temps. Ces deux paramètres sont très importants pour suivre l'évolution de l'essai puisque dès que la pression d'injection connaît une croissance soudaine et rapide (sans intervention de l'opérateur), ceci indique un arrêt de la progression du coulis: l'essai doit alors être interrompu pour éviter toute détérioration du matériel ou tout claquage du sol. Dans un milieu granulaire, on considère que le claquage se produit dès que la pression d'injection dépasse la valeur de 45 à 70 kPa par mètre de profondeur (2 à 3 psi par pied). Un rapide calcul pour le cas d'un sable contenant 10% d'humidité montre, qu'à une profondeur de 90 cm dans le cylindre d'injection, cela représente une pression moyenne de claquage de 52 kPa (7,5 psi). Cette valeur est diminuée à 17 kPa (2,5 psi) à une profondeur de 30 cm. Il faut toutefois tenir compte de l'effet de confinement provoqué par la

dépassées raisonnablement, l'effet du confinement n'ayant pas été calculé précisément. Quant à l'effet de confinement vertical, il n'en est pas question ici puisque le cylindre n'est pas muni de son couvercle pendant l'injection.

b) Suivi de la propagation du coulis

Le résultat du traitement par le coulis est visible lorsque l'on démoule le cylindre: le sable non injecté a tendance à sécher et à se détacher de la zone qui aura été injectée et qui sera donc durcie. De cette zone durcie, il est possible de prélever quelques échantillons par carottage dans le but de les soumettre à des essais caractérisant leur perméabilité et leur résistance après injection.

3.6.4 Essais après injection

Le prélèvement des carottes de mortier dans le volume de cylindre injecté est réalisé après 28 jours de mûrissement. Un patron de carottage est élaboré afin de comparer les résultats des différents essais pratiqués sur ces échantillons: on tient compte de la distance de l'échantillon au point d'injection, du type de sable injecté,...

Afin d'évaluer le gain d'étanchéité du milieu après injection, on procède à des essais:

- d'absorption;
- de perméabilité à l'eau.

Parallèlement, des essais de résistance à la compression et de module d'élasticité sont effectués.

a) Essais d'absorption

Conformément à la norme ASTM C97-83, les carottes de sable injecté sont sciées pour donner des échantillons d'environ 50 mm de longueur et 47 mm de diamètre. On détermine alors leur masse sèche (après 24 heures dans un four à $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$) et leur masse saturée (après

saturation pendant 48 heures dans de l'eau à $20 \pm 5^\circ\text{C}$). Le pourcentage d'absorption massique du mortier est obtenu par la relation suivante:

$$\% \text{ d'absorption massique} = \left(\frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

On pourra déduire de cet essai une valeur approximative de la porosité du milieu après injection:

$$n = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{\text{Volume}} \quad (3.8)$$

b) Essais de perméabilité à l'eau

Les mêmes essais que ceux réalisés sur des échantillons prélevés dans les colonnes de sable de 47 mm de diamètre sont effectués. On détermine la perméabilité longitudinale (K_v) de l'échantillon (Chapitre 2). Les échantillons étant carottés verticalement, cette perméabilité est mesurée perpendiculairement à la direction de l'injection. Lors de l'injection, le coulis sous pression a tendance à compacter le sable vers les parois du cylindre. La perméabilité transversale K_h des échantillons (dans la direction de l'injection) est donc plus faible que K_v .

c) Résistance à la compression et module élastique

L'essai de résistance en compression est instrumenté de façon à obtenir une courbe contrainte-déformation axiale et à en déduire le module élastique du mortier. Le taux de chargement est adapté selon l'état de l'échantillon.

3.7 Conclusion

L'effet d'échelle est un élément important lorsqu'une injection devant se faire sur un chantier est simulée en laboratoire. Il n'y a pas de proportionnalité directe entre les paramètres (les dimensions du milieu, les résultats d'injection obtenus, ...) dans une petite colonne de sable et sur un site réel. À petite échelle, les effets de bord sont beaucoup plus importants. On a donc, par

exemple, tout intérêt à travailler avec des dimensions suffisamment grandes pour que les limites fixées par les cylindres d'injection n'affectent pas les résultats.

Le plan expérimental présenté ici est mis en pratique sous forme de trois phases. Chaque phase permet la sélection de coulis pour la phase qui lui succède. On passe ainsi des essais de laboratoire traditionnels à des essais en semi grandeur plus proches des travaux d'injection que l'on peut avoir à réaliser en chantier.

Chapitre 4

CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE DES COULIS D'INJECTION

4.1 Introduction

Destinés à l'injection, les coulis de ciment doivent répondre à des critères de fluidité et de stabilité, ainsi que de résistance et de durabilité [MNIF, 1992]. La capacité d'un mélange à être injecté est également très importante pour permettre le traitement souhaité d'un milieu. De simples essais de laboratoire sont utilisés pour caractériser l'injectabilité de coulis de ciment dans les sables fins.

Dans cette première phase de l'étude, l'effet de l'ajout de fumée de silice, de bentonite ou d'agent colloïdal à des coulis de ciment conventionnel (type 30) ou de ciment microfin est étudié. Les propriétés rhéologiques, la stabilité et l'injectabilité sont analysées.

4.2 Coulis testés et essais réalisés

4.2.1 Coulis étudiés

Le tableau 3.2 présente tous les coulis testés sur le plan de leur rhéologie, de leur stabilité et de leur injectabilité dans un sol fin. Ce sont des coulis à base de ciment Portland type 10, type 30 ou de ciment microfin type Spinor A12. Leur rapport E/C varie de 0,5 à 2,0 et ils contiennent tous un adjuvant superplastifiant.

Les différents essais réalisés permettent d'évaluer l'effet du rapport E/C et du type de ciment utilisé sur les caractéristiques des mélanges et en particulier sur leur comportement à l'injection dans les colonnes de sable. D'autre part, l'influence de l'incorporation des divers ajouts minéraux présentés est également analysée. Pour ce faire, on procède à des essais rhéologiques, de stabilité et d'injectabilité.

4.2.2 Essais réalisés

Chaque coulis est soumis à trois types d'essais toujours réalisés selon la même séquence et dans un intervalle de temps d'environ 15 minutes.

a) Essais rhéologiques

Les essais rhéologiques suivants sont effectués afin de définir la fluidité, la maniabilité des mélanges [Laboratoire de mécanique des roches, 1994]:

- essai d'écoulement au cône Marsh;
- essai d'étalement au mini-cône d'affaissement;
- essai au rhéomètre.

Ces trois tests sont pratiqués immédiatement après malaxage des coulis et après une heure de conservation des mélanges en rotation permanente. Ceci permet d'apprécier le maintien, ou non, des propriétés des coulis au cours du temps.

b) Essais de stabilité

C'est presque essentiellement l'essai de ressuage forcé qui est réalisé lors de cette étude. Cet essai n'est pas systématiquement considéré dans les études de rhéologie, or il est important de connaître le comportement des coulis durant l'injection, sous l'effet des pressions. Si le coulis présente trop de filtration durant cette phase, sa composition varie de façon non négligeable et tout le volume de sol traité n'a pas les mêmes caractéristiques après injection. On relève le taux de ressuage au cours du temps, pendant 30 minutes. L'essai de ressuage statique est pratiqué seulement pour quelques coulis fabriqués à base de ciment microfin. Pour les coulis de ciment Portland, on sait que l'on a un ressuage statique très important dès que E/C est supérieur à 0,8.

c) Essais d'injectabilité

La norme NF P18-891 est appliquée ici mais l'injection des coulis est réalisée dans un sable à l'état saturé et non pas sec ou humide. D'une part, l'état humide dans la colonne est obtenu (selon la norme) par saturation puis égouttage de l'eau pendant une durée déterminée. Le fait d'égoutter la colonne de cette façon provoque un gradient de teneur en eau de sa base à son sommet; le milieu n'est plus uniforme. D'autre part, dans la pratique, il est rare d'injecter au-dessus de la nappe phréatique.

Le sable utilisé est un sable d'Ottawa type C109, tamisé à une granulométrie 0,160/0,630 mm. Ce matériau a été saturé par injection d'eau à une pression de 50 kPa (7 psi), par la base de la colonne. La saturation est considérée comme complétée lorsque l'on a recueilli 100 ml d'eau à l'extrémité supérieure de la colonne.

Pour chaque mélange testé, deux colonnes, devant être identiques sur le plan de leur compacité, sont montées simultanément afin de vérifier la répétabilité de l'essai. La mesure de temps de propagation de l'eau dans le sol, d'une extrémité à l'autre, permet de vérifier que le sable est mis en place de la même façon dans chaque colonne. Si le sable est compacté de façon insuffisante, la perméabilité à l'eau des colonnes est différente.

4.3 Résultats des essais et discussion

Les résultats numériques de tous les essais menés sur les coulis considérés sont regroupés en annexe 2.

4.3.1 Effets du rapport E/C et du type de ciment

À l'exception du cas des mélanges fabriqués à E/C égal à 0,5 et 0,6; les propriétés rhéologiques des coulis de ciment type 30 et de ciment microfin (mélanges T1,2; T2,0; S1,2 et S2,0) sont relativement semblables. Avec un rapport E/C de 1,2 ou 2,0; les coulis ont la même

fluidité; alors qu'avec un rapport E/C de 0,5 ou 0,6, les coulis à base de ciment microfin sont moins fluides que ceux à base de ciment Portland type 30. Par exemple, les mélanges T0,5 et T0,6 ont des diamètres d'étalement au mini-cône respectifs de 175 et 188 mm; alors que pour les mélanges à base de ciment microfin S0,5 et S0,6; ils sont de 147 et 173 mm . De plus, le rapport E/C semble avoir moins d'influence sur les mélanges contenant du ciment type 30 que sur ceux fabriqués avec du ciment microfin (Figure 4.1).

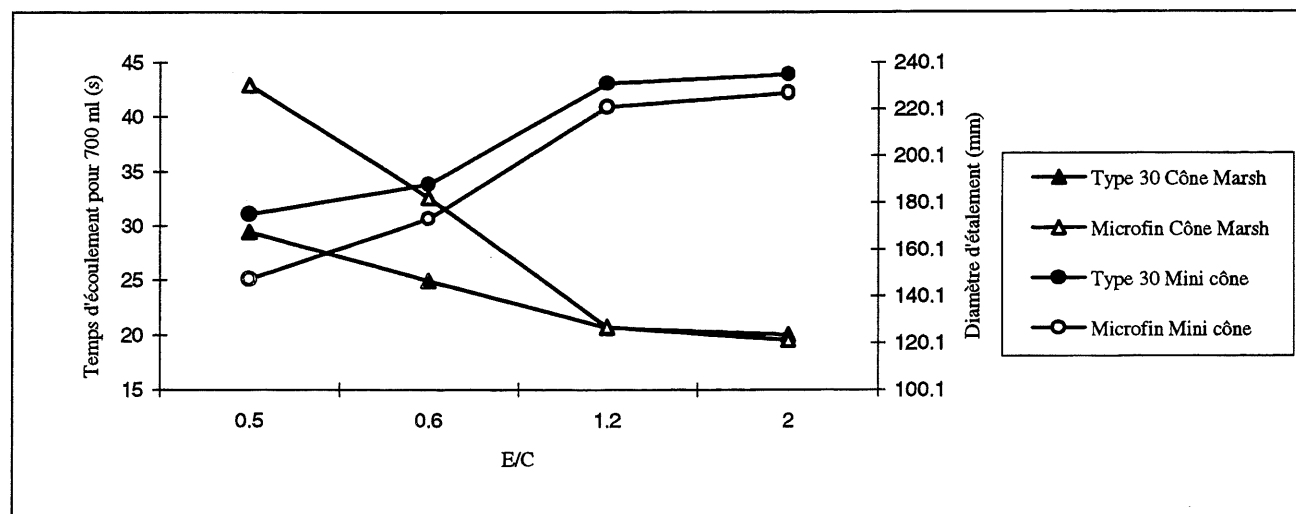


Figure 4.1 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur les paramètres de fluidité

Plus précisément, lorsque E/C est égal à 0,5 ou 0,6; la viscosité des coulis de ciment microfin est deux fois plus élevée que celle des coulis de ciment type 30. À titre d'exemple, on passe de 22,4 cP pour le coulis à base de type 30 (à E/C = 0,5) à 47,9 cP pour celui à base de ciment microfin avec le même rapport E/C. Cependant, lorsque E/C est augmenté à 1,2 ou 2,0; la viscosité est sensiblement la même pour les deux types de mélanges (Figure 4.2).

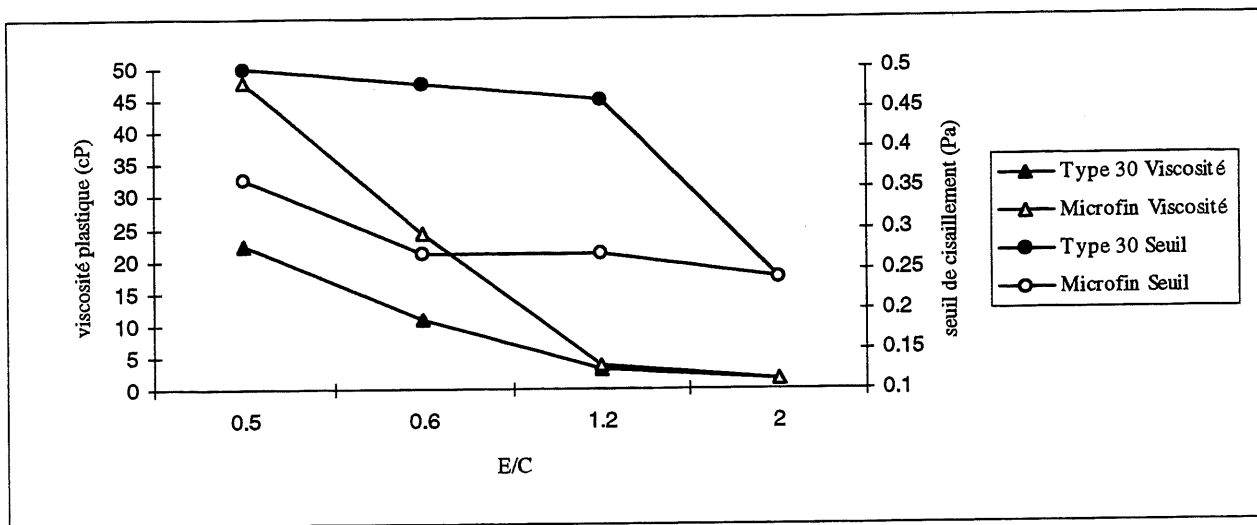


Figure 4.2 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur les paramètres rhéologiques

Ce phénomène est donc lié à la finesse des ciments: plus les grains sont petits, plus la surface spécifique et donc le nombre de points de contact intergranulaires sont grands. La viscosité est donc plus élevée [LEGRAND, 1980]. De plus, l'augmentation de surface spécifique interfère avec les propriétés d'écoulement du coulis pour les faibles rapports E/C. Lorsque E/C se trouve être supérieur à 1,2; les grains de ciment sont plus espacés et les variations de friction interne sont assez faibles pour ne pas affecter la viscosité.

Excepté pour des rapports E/C de 0,5; le taux de ressuage forcé est élevé. Il est même supérieur à 55% (après 30 minutes d'essai) pour les rapports E/C supérieurs à 1,2 (le ressuage forcé maximal acceptable pour un coulis est d'environ 10%). Toutefois, entre les coulis à base de ciment type 30 et ceux à base de ciment microfin, la différence de taux de ressuage forcé reste peu importante dans le cas des faibles rapports E/C. Les coulis de base Portland présentent un taux de ressuage plus fort que ceux à base de ciment microfin (Figure 4.3).

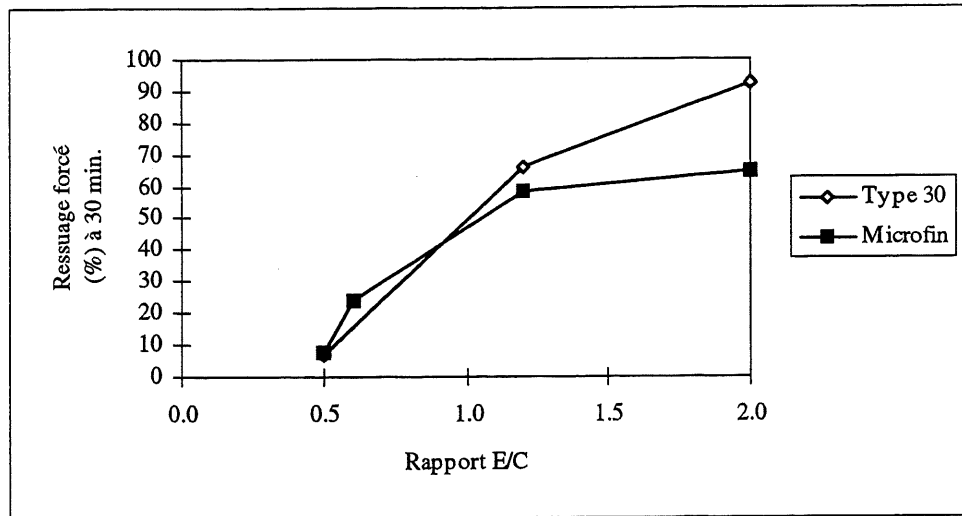


Figure 4.3 Effet du rapport E/C et du type de ciment sur le ressuage forcé

De façon similaire, le ressuage statique des coulis de ciment microfin à rapport E/C de 0,5 reste nul, même après 24 heures d'essai (annexe 2). Pour E/C égal à 1,2 et 2,0; pour ce même type de coulis, on a un ressuage statique de 4 à 7% après deux heures d'essai (la limite acceptable étant de 5%). On n'observe toutefois pas de sédimentation proprement dite des particules de ciment.

Les essais d'injectabilité à la colonne de sable indiquent, quant à eux, une progression moyenne de 12,5 cm à partir de la base de la colonne pour des coulis fabriqués avec E/C égal à 0,5 et 0,6. Ce cheminement se fait d'une extrémité à l'autre des colonnes pour des rapports E/C de 1,2 et 2,0; quel que soit le type de ciment utilisé. Si on se réfère aux lois d'injectabilité décrites au chapitre 2, les coulis auraient tous du être injectables dans ce sable 0,16/0,63 microns. En effet, son diamètre correspondant à 15% de passant est de 250 microns. Il suffit donc que le diamètre du ciment correspondant à 85% de passant soit inférieur à 100 microns, ce qui est vérifié sur les courbes granulométriques des ciments de type 30 et microfin (Figure 3.1). Les problèmes de floculation des grains de ciment (en particulier à faible rapport E/C) sont mis en évidence ici. Le manque de stabilité, plus important pour les coulis de ciment type 30, explique également que leur progression soit plus lente que celle des coulis de ciment microfin (Tableau 4.1).

TABLEAU 4.1 RÉSULTATS DES ESSAIS D'INJECTION

Coulis		Paramètres rhéologiques du coulis			Hauteur atteinte		Temps (s)
Ciment	E/C	Viscosité plastique (cP)	Viscosité apparente à 3 t/mn (cP)	Viscosité apparente à 300 t/mn (cP)	Hauteur (cm)	% de la colonne totale	
Microfin	2,0	1,7	50	3	36	100	22
Microfin	1,2	3,7	50	6	36	100	69
Type 30	2,0	1,7	50	4	36	100	210
Type 30	1,2	3,2	100	6	36	100	320
Microfin	0,6	24,3	100	27	12,5	35	(36)
Microfin	0,5	47,9	100	51	5	14	(2)
Type 30	0,5	22,4	100	25	5	14	(20)

() temps nécessaire au coulis pour atteindre la hauteur donnée

On retrouve ces résultats sur les figures 4.4 et 4.5 ci-après. On a une distinction très nette entre les performances des deux types de coulis (type 30 et microfin). On constate également que la vitesse de pénétration des coulis dans les colonnes est tout aussi fonction de leur seuil de cisaillement que de leur viscosité plastique. Mais on ne peut pas généraliser une relation entre ces paramètres, le nombre d'injections est trop insuffisant.

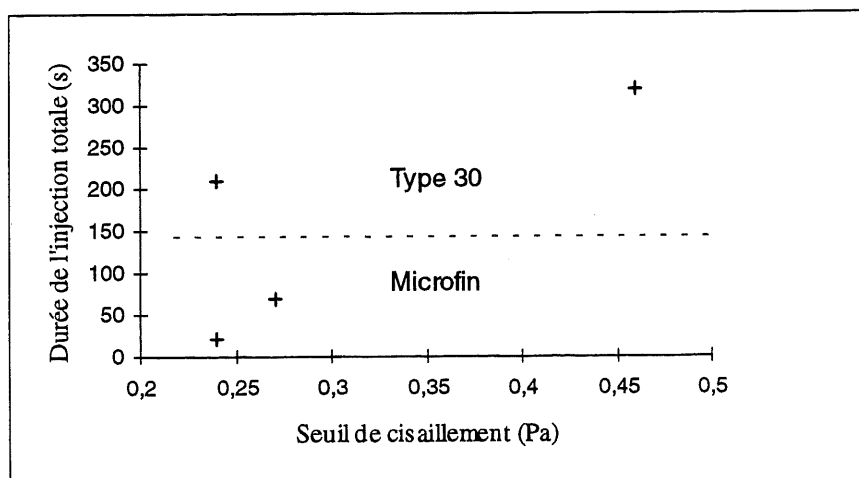


Figure 4.4 Évolution de la durée de l'injection totale selon le seuil de cisaillement des coulis

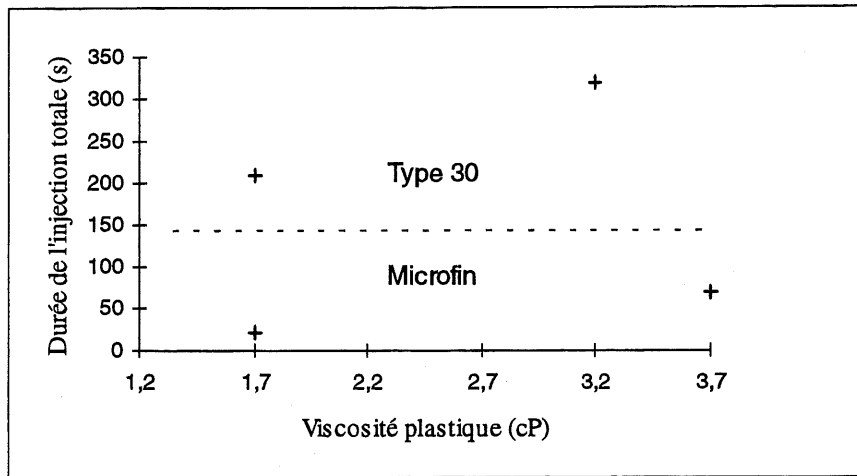


Figure 4.5 Évolution de la durée de l'injection totale avec la viscosité plastique des coulis

Les coulis qui donnent les meilleurs résultats sur le plan de l'injectabilité, sont aussi ceux qui ont les taux de ressuage forcé les plus élevés (Figure 4.6). Ainsi, tout au long de la progression du coulis à travers le sable, le ressuage se produit et a pour conséquence une augmentation du rapport E/C du mélange du bas vers le haut de la colonne.

La hauteur des colonnes de sable normalisées étant seulement de 36 cm, le test d'injectabilité n'est pas sélectif pour les coulis traversant toute la colonne. Des colonnes de plus grande longueur sont proposées pour des tests ultérieurs.

Ainsi, les figures 4.6 et 4.7 montrent qu'un coulis est capable de traverser au moins 36 cm (dans un sable de granulométrie 0,160/0,630 mm) quand son taux de ressuage forcé est supérieur à 30% et son temps d'écoulement au cône Marsh (pour 700 ml de coulis) est inférieur à 25 s.

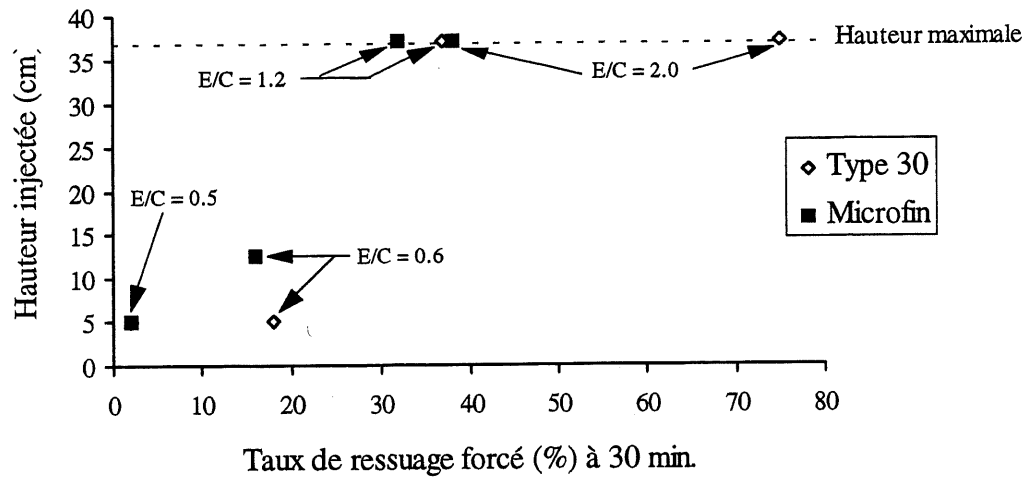


Figure 4.6 Variations de la hauteur injectée en fonction du taux de ressuage forcé

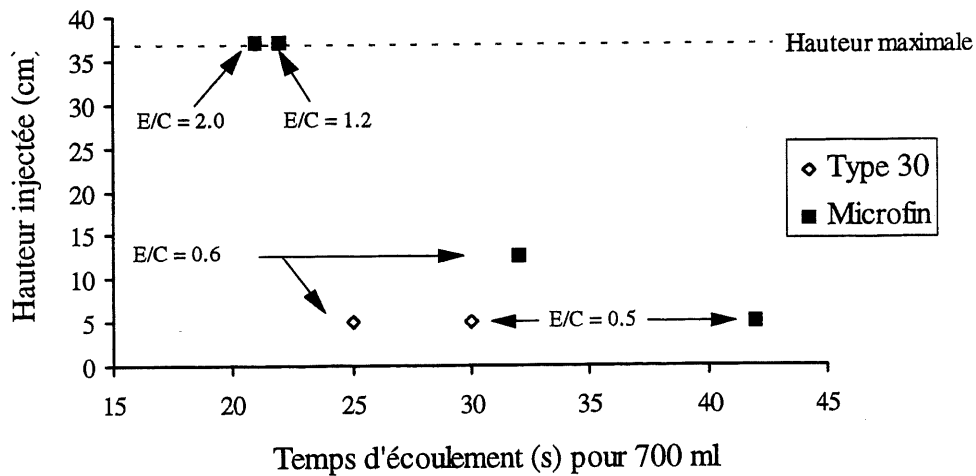


Figure 4.7 Variations de la hauteur injectée en fonction de l'écoulement au cône Marsh

Finalement, les critères d'injectabilité tenant compte de la dimension des grains ne permettent pas de prédire l'aptitude d'un coulis à injecter un sol donné. Il faut aussi considérer le ressuage possible des mélanges et donc leur composition (rapport E/C , présence d'ajouts). De plus, cette instabilité des coulis, sous l'effet de la pression d'injection et de la filtration par les grains du sable, crée une augmentation du rapport E/C tout au long de la colonne. À titre d'exemple, on calcule, pour l'injection du coulis de ciment microfin, avec $E/C=2,0$; que la masse volumique d'un échantillon pris à la base de la colonne injectée est de $2,18 \text{ g/cm}^3$ contre

1,98 g/cm³ au sommet. Ceci représente une perte massique de 8% entre le bas et le haut de la colonne.

4.3.2 Effet de l'addition de fumée de silice

Dans le cas des ciments Portland, utilisée en substitution à une partie du ciment, la fumée de silice permet une diminution de la chaleur d'hydratation et minimise donc les risques de fissuration (Chapitre 2). Par ailleurs, elle améliore la stabilité des coulis et leur résistance en compression après injection. Par contre, associée à un ciment microfin, la fumée de silice provoque une densification importante du coulis, d'où une dessiccation des échantillons et une perte de résistance [BALLIVY et coll., 1995].

Les résultats d'essais sur coulis additionnés d'ajouts minéraux figurent en annexe 2. L'addition de fumée de silice est considérée avec des coulis de ciment type 30, à des rapports E/C de 0,5; 1,2 et 2,0. La fumée de silice a pour conséquence une diminution de la fluidité des mélanges, surtout pour de faibles rapports E/C. Le temps d'écoulement au cône Marsh et la viscosité plastique augmentent quand on incorpore 6% de fumée de silice, en substitution au ciment. Pour des rapports E/C supérieurs à 0,5; l'utilisation de fumée de silice n'a pas vraiment d'influence sur le ressuage forcé comme le montre la figure 4.8.

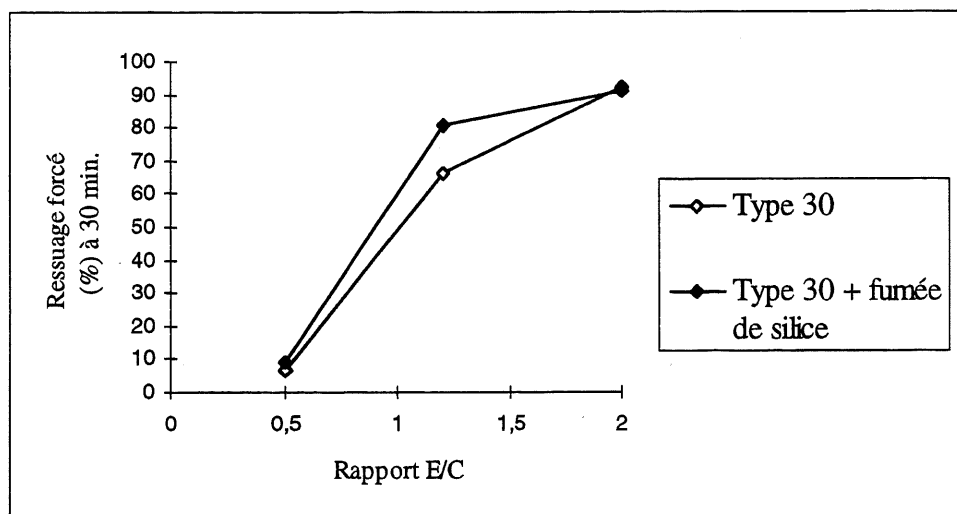


Figure 4.8 Taux de ressuage forcé pour les coulis additionnés de fumée de silice

L'injectabilité des coulis de ciment type 30 est affectée par l'addition de fumée de silice, comme on le voit sur la figure 4.9. Pour un rapport E/C de 0,5; un bouchon apparaît immédiatement à la base de la colonne et le coulis n'est alors plus capable de progresser dans le sable. Pour les coulis de rapport E/C égal à 1,2 ou 2,0; la hauteur atteinte par le coulis dans la colonne est d'environ 10 cm en présence de fumée de silice. Sans fumée, l'injection était totale.

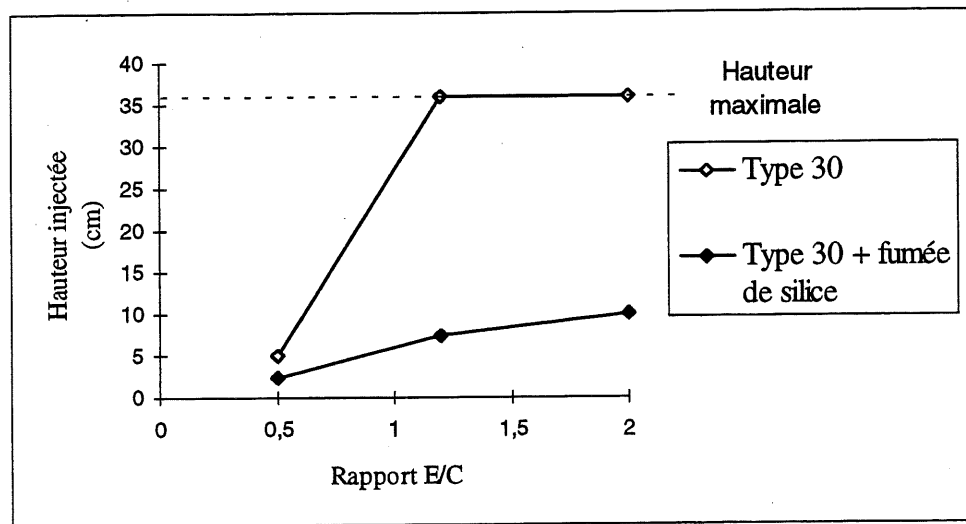


Figure 4.9 Hauteur injectée par les coulis additionnés de fumée de silice

De façon générale, l'ajout de fumée de silice a eu pour conséquence une augmentation ou un maintien des viscosités et une diminution du seuil de cisaillement des coulis (Tableau 4.2).

TABLEAU 4.2 EFFET DE LA FUMÉE DE SILICE SUR LA RHÉOLOGIE DES COULIS DE CIMENT TYPE 30

E/C	Sans fumée de silice			Avec fumée de silice		
	0,5	1,2	2,0	0,5	1,2	2,0
Viscosité plastique (cP)	22	3	2	35	4	2
Viscosité apparente à 300 t/mn. (cP)	25	6	4	36	6	4
Seuil de cisaillement (Pa)	0,5	0,5	0,2	0,3	0,3	0,2

Le temps nécessaire aux coulis avec fumée de silice pour atteindre leur distance maximale d'injection et celui nécessaire aux coulis sans fumée pour atteindre la même hauteur varient de moitié pour un rapport $E/C=1,2$ mais sont les mêmes pour $E/C=2,0$. L'écart de vitesse d'injection diminue avec l'augmentation du rapport E/C , la différence de seuil de cisaillement est alors moins grande.

Finalement, l'utilisation de fumée de silice n'a pas modifié le ressuage forcé des coulis de ciment type 30 et a diminué leur pénétrabilité dans le sable 0,16/0,63 mm. C'est l'augmentation de viscosité plastique liée à l'ajout de fumée de silice qui est à l'origine du blocage de l'injection.

4.3.3 Effet de l'addition d'agent colloïdal

L'ajout d'agent colloïdal étant accompagné d'une augmentation de la teneur en superplastifiant (Chapitre 3), on n'observe pas de variation dans les temps d'écoulement au cône Marsh. Toutefois, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique ont quelque peu augmenté, que ce soit pour les coulis à base de ciment microfin ou de ciment Portland.

L'effet le plus notable de l'agent colloïdal concerne le taux de ressuage. Quel que soit le ciment, ce taux est diminué par l'ajout de gomme Welan. Cette diminution est d'environ 8% à 10 minutes et 18% à 30 minutes (Figure 4.10). L'augmentation de la teneur en superplastifiant peut également participer à cette diminution du ressuage: les particules de ciment sont mieux dispersées et on a moins d'eau libre dans le coulis (Chapitre 3), mais ce n'est pas un facteur majeur. Par contre, le ressuage statique est très légèrement augmenté (de 2% environ après 3 heures d'essai).

Sur le plan de la capacité de pénétration du coulis dans les colonnes, les mélanges contenant de l'agent colloïdal traversent totalement les 36 cm de sable. Mais, étant donné la plus forte viscosité des coulis avec agent colloïdal, ceci requiert un temps deux fois plus long que pour les mélanges sans agent colloïdal (à même rapport $E/C=2,0$).

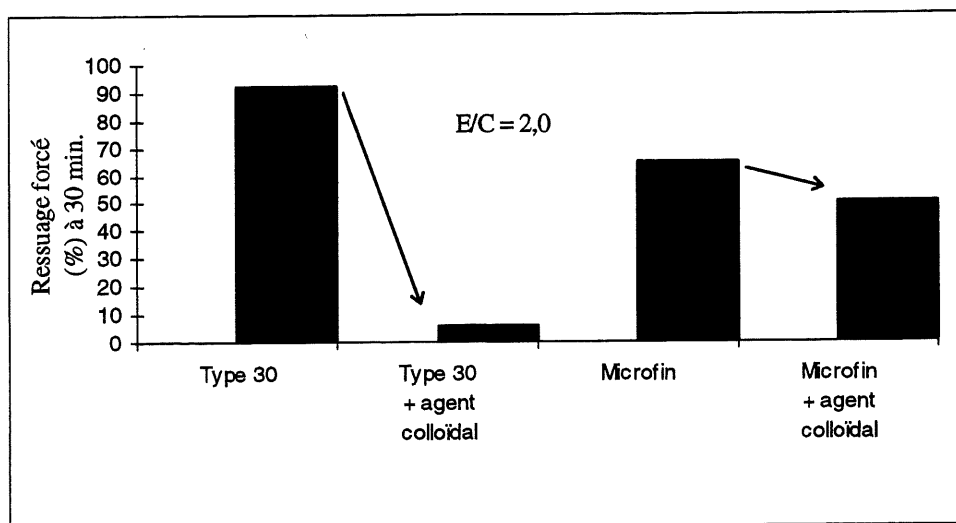


Figure 4.10 Taux de ressuage forcé pour les coulis additionnés d'agent colloïdal

Ainsi, l'agent colloïdal est capable de stabiliser les coulis de ciment de rapport $E/C=2,0$ tout en maintenant leur aptitude à injecter le sable 0,16/0,63 mm. De plus, après injection, seule une variation négligeable de masse volumique (3%) entre les échantillons prélevés en bas ($2,16 \text{ g/cm}^3$) et en haut de colonne ($2,09 \text{ g/cm}^3$) est observée.

4.3.4 Effet de l'addition de bentonite

L'ajout de bentonite est testé avec les trois types de ciment (type 10, type 30 et ciment microfin) pour un rapport E/C de 1,2. Le dosage en superplastifiant a été augmenté de 1,25% à 1,55% pour le cas du ciment microfin et du type 30, de façon à éviter des viscosités trop élevées.

Quel que soit le mélange utilisé, on observe une diminution de fluidité des mélanges. Comme lors de l'ajout de fumée de silice, la viscosité augmente avec la présence de bentonite, alors que le seuil de cisaillement diminue.

L'introduction de bentonite a moins de conséquences négatives sur la pénétrabilité des coulis dans les colonnes, relativement à l'ajout de fumée de silice. Le coulis à base de ciment Portland type 30 devient moins performant avec la bentonite (Figure 4.11). Sans bentonite, il était

déjà très lent à pénétrer toute la colonne (320 s); avec la bentonite, il atteint seulement une dizaine de centimètres (en 30 s). L'influence est beaucoup moins importante avec le ciment microfin pour lequel on atteint 35 cm (en 37 s) avec la bentonite contre une injection totale (en 60 s) sans cet ajout.

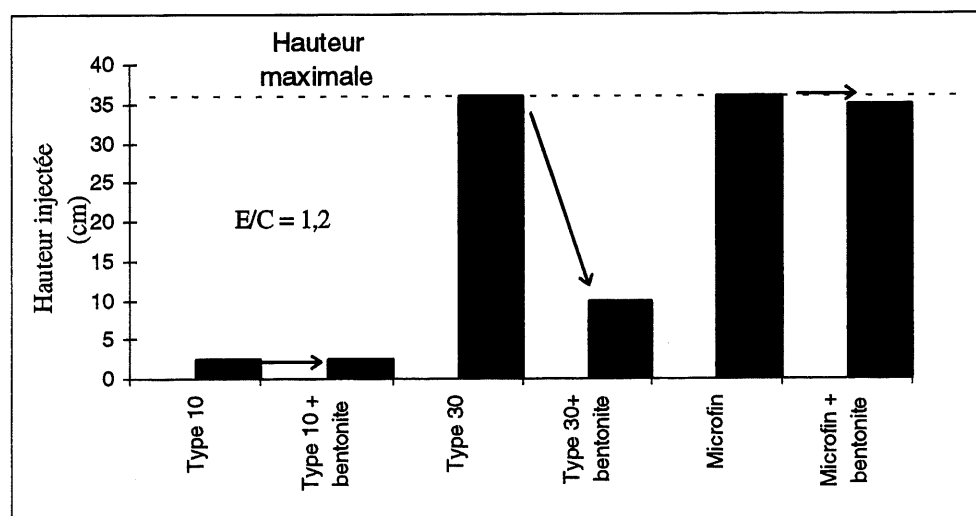


Figure 4.11 Hauteur injectée par les coulis additionnés de bentonite

Comme pour l'ajout de fumée de silice, l'ajout de bentonite accélère les injections dans les premiers centimètres des colonnes de sable mais, cette pénétration se trouve rapidement bloquée.

Le taux de ressuage forcé pour les coulis à base de ciment type 30 et de ciment microfin est diminué environ de moitié avec l'ajout de bentonite (Figure 4.12). De même, le taux de ressuage statique a été divisé par trois lors de cet ajout au ciment microfin. Notons toutefois que, pour ces deux mélanges, le dosage en superplastifiant a été augmenté (de 1,25 à 1,55%) parallèlement à l'ajout de 2% de bentonite: il est probable que ce soit cet adjuvant qui est à l'origine d'une meilleure stabilité du coulis. D'ailleurs, pour le ciment type 10 (pour lequel la teneur en superplastifiant n'a pas été augmentée), l'ajout de bentonite a au contraire fait augmenter le ressuage de façon non négligeable (de 3,2 à 29,3%, après 30 minutes d'essai).

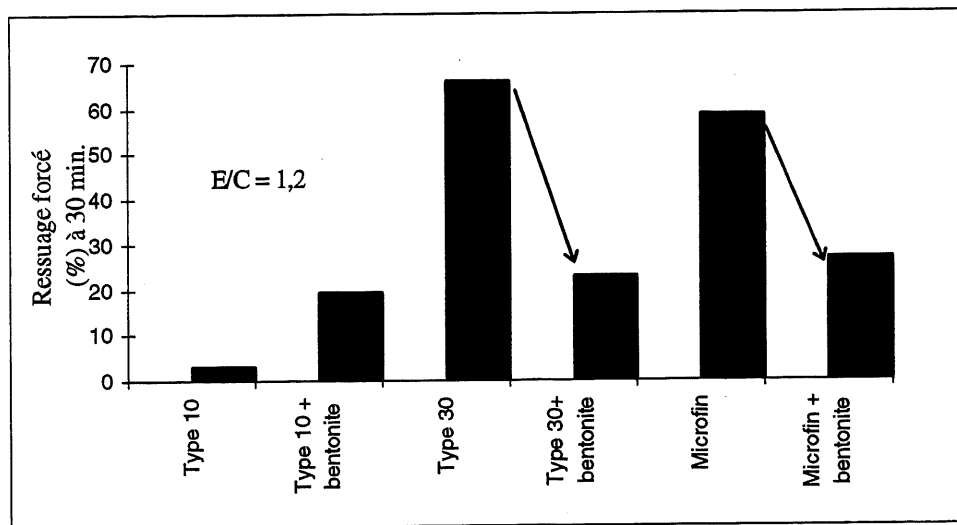


Figure 4.12 Taux de ressuage forcé des coulis additionnés de bentonite

La bentonite permet une amélioration de la stabilité des coulis mais modifie de façon importante l'injectabilité des coulis, surtout lors de l'utilisation de ciment Portland type 30. Même si elle diminue le ressuage, la bentonite augmente de façon conséquente la viscosité des coulis, l'injection bloque rapidement.

4.4 Conclusions: critères de sélection de coulis

Différents coulis à base de ciment type 10, type 30 et de ciment microfin ont été testés en laboratoire afin d'évaluer l'effet du rapport E/C, du type de ciment ainsi que de l'ajout d'agent colloïdal, de fumée de silice et de bentonite sur les propriétés rhéologiques et sur l'injectabilité des coulis dans des sables fins (0,160/0,630 mm).

La finesse du ciment utilisé ne suffit pas à assurer la pénétrabilité d'un coulis dans un sol. Il faut aussi tenir compte de ses caractéristiques de fluidité et de stabilité.

Les mélanges sans ajout ayant un taux de ressuage forcé supérieur à 30% et un temps d'écoulement au cône Marsh inférieur à 25 s (pour 700 ml de coulis) sont capables de traverser complètement les colonnes de sable 0,160/0,630 mm (hauteur 36 cm, diamètre 22 mm). Toutefois,

l'étanchement d'un milieu n'est pas atteint si le ressuage forcé est trop important: loin du point d'injection, E/C est augmenté, les particules de ciment sont de moins en moins nombreuses. Il faut donc chercher à stabiliser les coulis.

L'incorporation de fumée de silice ou de bentonite n'améliore pas la pénétrabilité des mélanges: la fumée de silice bloque très rapidement l'injection, la bentonite agit de même pour les coulis de ciment type 30 mais ne fait que ralentir la pénétration des coulis de ciment microfin.

L'ajout d'agent colloïdal réduit de façon significative le taux de ressuage forcé tout en assurant l'injectabilité du coulis mais ralentit la vitesse de pénétration de celui-ci dans le sol: c'est en particulier l'augmentation de la viscosité plastique des coulis lors de l'ajout de cet agent qui cause ce ralentissement.

De façon générale, ces ajouts ou adjuvants ont un effet non seulement sur le ressuage forcé mais aussi sur la viscosité et le seuil de cisaillement des coulis. Ainsi, si on considère l'évolution de la distance injectée et de la durée d'injection totale d'une colonne respectivement en fonction de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement des coulis (tous types de coulis confondus), on constate que seuls les coulis de viscosité plastique supérieure à 10 cP sont capables de traverser complètement la colonne de sable 0,160/0,630 mm. Une corrélation entre distance injectée et viscosité plastique, ainsi qu'entre durée de l'injection et seuil de cisaillement est présentée sur les figures 4.13 et 4.14. Elles donnent une idée des valeurs maximales de viscosité et de seuil de cisaillement qu'il est intéressant d'approcher pour avoir une injection convenable.

Étant donné ces résultats, pour les essais de mesure de perméabilité à l'eau après injection, la sélection des coulis porte principalement sur ceux à base de ciment microfin. En effet, on sait que le passage à des colonnes de plus gros diamètre a pour conséquence une progression plus difficile du coulis à travers le sable [PERRET, 1995]: dans de nombreux cas, le coulis n'atteint même pas le haut des colonnes étant donné que la surface de frottement augmente proportionnellement au volume des colonnes alors que le coulis utilisé garde la même viscosité. Il faut donc considérer les mélanges ayant vraiment donné les meilleurs résultats d'injection dans les

petites colonnes de 22 mm de diamètre: coulis à base de ciment microfin, rapport E/C de 1,2 et 2,0.

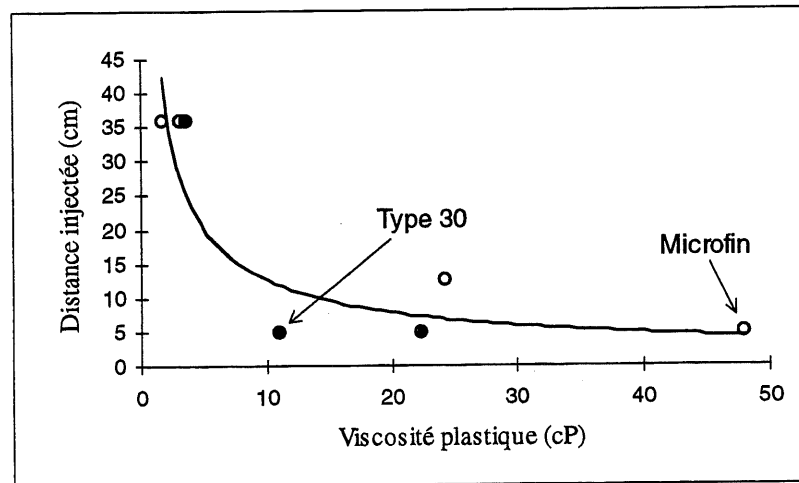


Figure 4.13 Évolution de la distance injectée en fonction de la viscosité plastique des coulis

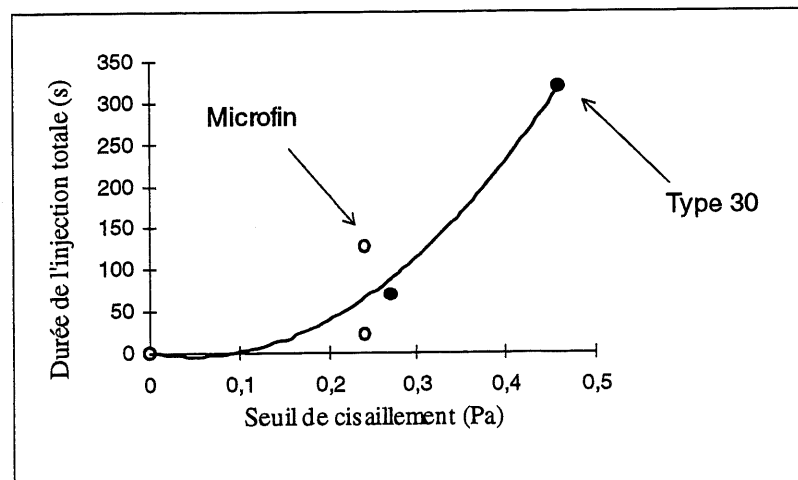


Figure 4.14 Évolution de la durée de l'injection totale d'une colonne en fonction du seuil de cisaillement des coulis

Chapitre 5

ESSAIS DE PERMÉABILITÉ APRÈS INJECTION

5.1 Introduction

Conformément au programme expérimental (Chapitre 3), on procède à l'injection de colonnes de 47 mm de diamètre dans lesquelles on prélève des échantillons pour des essais de perméabilité à l'eau.

5.2 Choix des coulis et injection

Étant donné les résultats obtenus lors des essais d'injectabilité à la colonne de sable, six coulis sont proposés pour l'injection des colonnes de 47 mm de diamètre. Il s'agit des mélanges de rapport E/C=1,2 et/ou 2,0 à base de

- ciment microfin;
- ciment microfin et d'agent colloïdal;
- de ciment Portland type 30;
- ciment Portland type 30 et d'agent colloïdal.

5.2.1 Injection des colonnes de 47 mm

Les colonnes sont remplies de sable sur une hauteur de 36 cm, en prenant soin d'obtenir la même densité en place que dans les petites colonnes de 22 mm. Cette densité est d'environ $1,8 \text{ g/cm}^3$ et est obtenue en réalisant, comme pour les essais d'injectabilité selon la norme européenne, trois couches successives. Deux colonnes sont montées pour chaque coulis, toujours pour vérifier la reproductibilité de l'essai. Les colonnes devant être saturées, on mesure le temps de remplissage d'une éprouvette de 100 ml d'eau à la sortie de chaque colonne (éq. 3.4). On en déduit la perméabilité à l'eau initiale du sable en place.

Le tableau 5.1 récapitule les conductivités hydrauliques obtenues pour les deux colonnes de chaque type de coulis et les résultats de l'injection (celle-ci s'effectue toujours à 76 kPa, c'est-à-dire 11 psi). Les coulis à base de ciment type 30 ne font pas l'objet d'essai de perméabilité. En effet, ils n'ont pas suffisamment progressé dans les colonnes.

TABLEAU 5.1 INJECTION DANS LES COLONNES DE 47 MM DE DIAMÈTRE

E/C	1,2			2,0		2,0	
Teneur en superplastifiant	1,25%			1,25%		2,0%	
Teneur en agent colloïdal	0%			0%		0,030%	0,040%
Ciment		Microfin	Type 30	Microfin	Type 30	Microfin	Type 30
Perméabilité à l'eau estimée (m/s)	#1	1,6E-04	5,0E-04	5,0E-04	5,0E-04	5,2E-04	5,0E-04
	#2	5,0E-04	5,2E-04	5,0E-04	5,0E-04	5,0E-04	5,1E-04
Hauteur injectée (% de la colonne totale)	#1	6,9	23	100	5	100	5
	#2	2	6	100	4	100	8

Les valeurs des perméabilités initiales (Tableau 5.1) étant toutes du même ordre de grandeur, on considère que toutes les colonnes sont «identiques» avant l'injection.

De façon générale, le temps de prise initiale des coulis est inférieur à 24 h. C'est donc après une journée que les colonnes sont placées dans de l'eau saturée en chaux: seules les extrémités sont en contact avec le liquide puisque les colonnes ne sont pas démoulées. Le démoulage a lieu deux jours plus tard afin d'être certain d'avoir dépassé le temps de prise finale qui peut être supérieur à 36 heures pour les coulis de ciment microfin de rapport E/C=2,0.

5.2.2 Échantillonnage des colonnes

Lorsqu'une colonne a été totalement injectée, des échantillons sont prélevés le long de celle-ci. Dans la mesure du possible, un premier échantillon est scié à partir d'un centimètre au-dessus de la base de la colonne. Puis un deuxième échantillon est pris, de la même façon, à un centimètre du sommet de la colonne. La longueur de ces tronçons de colonne se situe entre 55 et

60 mm, pour un diamètre de 47 mm (Figure 5.1). Chaque face de chaque échantillon est ensuite surfacée pour obtenir un bon parallélisme et une bonne planéité des faces.

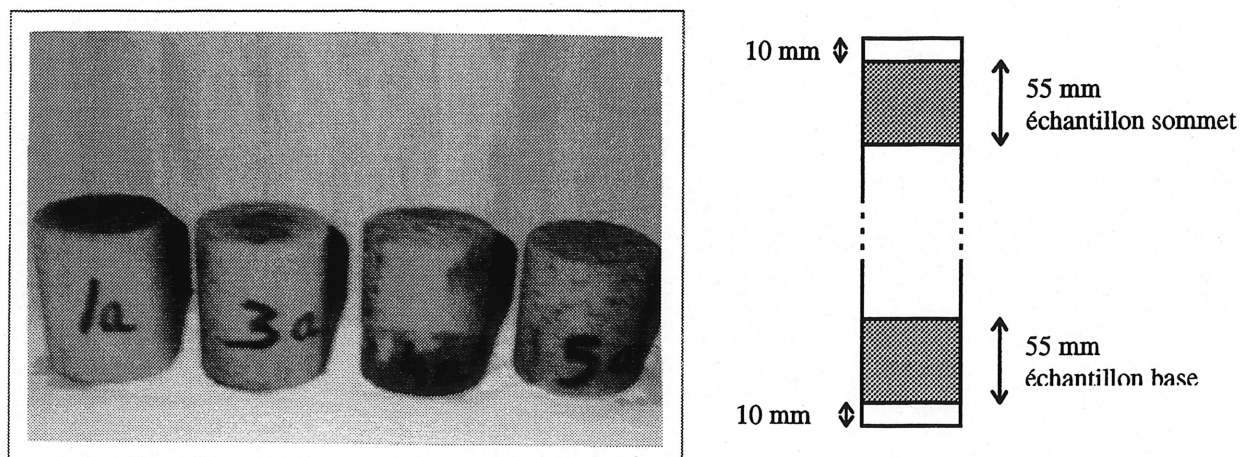


Figure 5.1 Échantillons issus des colonnes injectées

Les colonnes figurant dans le tableau 5.1 ont donné des échantillons de bonne qualité. Seul le coulis à rapport $E/C=1,2$ n'a pas permis d'obtenir un tronçon du sommet de la colonne. Dans la première colonne, il n'a atteint que 2,5 cm de hauteur. Dans la seconde, il a toutefois progressé jusqu'à 25 cm: un échantillon a été prélevé à sa base et un autre scié entre 19 et 24 cm de hauteur dans la colonne.

5.3 Résultats des essais et discussion

Ces essais portent sur dix échantillons. Le perméamètre utilisé comportant six cellules, deux séries d'essais sont réalisées. La première a permis de tester les échantillons fabriqués à partir d'un coulis de rapport $E/C=2,0$ et contenant de l'agent colloïdal, ainsi que ceux injectés avec un coulis de rapport 1,2. Dans un deuxième temps, les quatre derniers échantillons avec $E/C=2,0$; sans agent colloïdal, sont testés.

5.3.1 Déroulement des essais

Les échantillons mis en place dans les cellules sont soumis à un gradient hydraulique égal à 20 selon la norme ASTM D 5084 (Chapitre 3). Étant donné que la longueur moyenne des échantillons est d'environ 55 mm, un tel gradient impose une pression d'environ 11 kPa.

L'écoulement d'eau dans l'échantillon risque d'entraîner quelques particules de l'échantillon (grains de sable, particules de ciment,...). Aussi, afin de quantifier ce phénomène, s'il a lieu, on détermine la masse de l'échantillon avant et après l'essai de perméabilité à l'eau. On relève au cours de l'essai, à des intervalles de temps réguliers, la hauteur d'eau dans la burette et dans la colonne d'alimentation en eau. On calcule alors la perméabilité à l'eau K :

$$K = \frac{Q \times L}{A \times t \times h} \quad (5.1)$$

avec Q : débit, m^3/s

L : longueur de l'échantillon, m

A : section de l'échantillon, m^2

t : intervalle de temps entre deux mesures, s

h : différence des hauteurs d'eau entre la burette et la colonne d'alimentation, m.

L'évolution de la perméabilité en fonction du temps est alors tracée: la forme générale présente une tendance à la stabilisation autour d'une valeur de perméabilité qui est considérée comme la perméabilité à l'eau de l'échantillon (Figure 5.2).

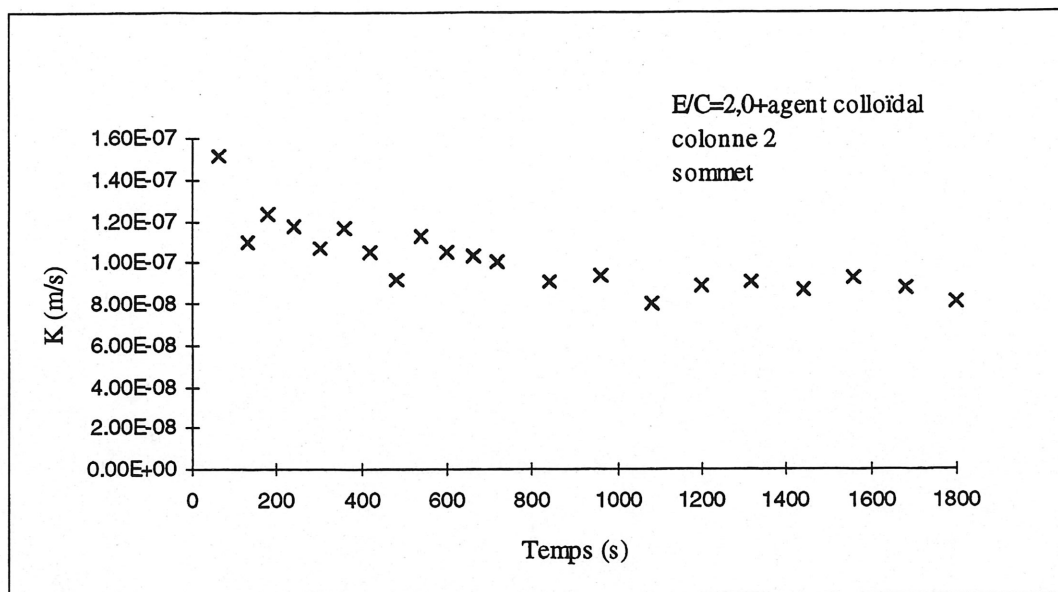


Figure 5.2 Exemple de résultat de l'essai de perméabilité

5.3.2 Résultats

À titre de comparaison, le tableau 5.2 présente les observations faites sur les échantillons: masse volumique initiale ρ_i , variation de masse Δm durant l'essai, aspect physique, durée de l'essai.

TABLEAU 5.2 DÉROULEMENT DES ESSAIS DE PERMABILITÉ À L'EAU

E/C	Échantillon	ρ_i (g/cm ³)	Δm (g)	Aspect de l'échantillon	Durée de l'essai	Perméabilité (m/s)
2,0 + agent colloïdal	colonne 1 haut	2,09	+ 0,13	uniforme	23 minutes	1,3E-07
	colonne 2 haut	2,06	+ 0,24	uniforme	30 minutes	9E-08
	colonne 1 bas	2,16	+ 1,43	coulis concentré à la base	120 heures	1E-09
	colonne 2 bas	2,17	---	essai infaisable	---	---
2,0	colonne 1 haut	1,98	+ 6,56	uniforme	26 minutes	6E-08
	colonne 2 haut	1,98	+ 5,23	uniforme	26 minutes	7,5E-08
	colonne 1 bas	2,11	+ 3,12	coulis concentré à la base	30 minutes	9E-07
	colonne 2 bas	2,18	+ 0,76	coulis concentré à la base	124 heures	6E-12
1,2	colonne 2 haut	2,00	+ 3,72	uniforme	22 minutes	1,4E-07
	colonne 2 bas	2,14	+ 0,95	uniforme	120 heures	2,5E-10

On distingue deux types d'essais: certains durent moins d'une trentaine de minutes, alors que d'autres durent quatre à cinq jours. De façon générale, la première catégorie correspond aux échantillons prélevés au sommet des colonnes injectées. Une exception apparaît toutefois pour l'échantillon basal de la colonne 1 traitée par le coulis à rapport $E/C=2,0$: celui-ci a également été l'objet d'un essai rapide (30 minutes). Cet échantillon n'est donc pas pris en considération dans ce qui suit.

5.3.3 Effet du rapport E/C

On aurait pu s'attendre à ce que les plus faibles perméabilités après injection apparaissent pour les sables traités par les coulis à faibles rapports E/C . Or, c'est l'effet inverse qui se produit à la base des colonnes (Figure 5.3). Que l'on considère le sommet ou la base des colonnes. Le coulis à $E/C=2,0$ donne le meilleur étanchement, suivi par le coulis à $E/C=1,2$ et enfin par celui à $E/C=2,0$ + agent colloïdal. On n'observe aucune tendance des valeurs de perméabilité avec le rapport E/C pour les échantillons des bases des colonnes. Par contre, au sommet, la perméabilité diminue avec l'augmentation du rapport E/C .

Il est probable que ce phénomène soit lié à la difficulté des coulis contenant une plus grande quantité de matériau cimentaire à se propager parfaitement dans tous les pores du milieu. Il reste, par conséquent, après injection, des zones moins bien traitées qui deviennent des chemins préférentiels d'écoulement pour l'eau. Les coulis à $E/C=2,0$; même si ils contiennent moins de liant, se répartissent mieux dans le milieu et créent une barrière plus homogène face à l'écoulement.

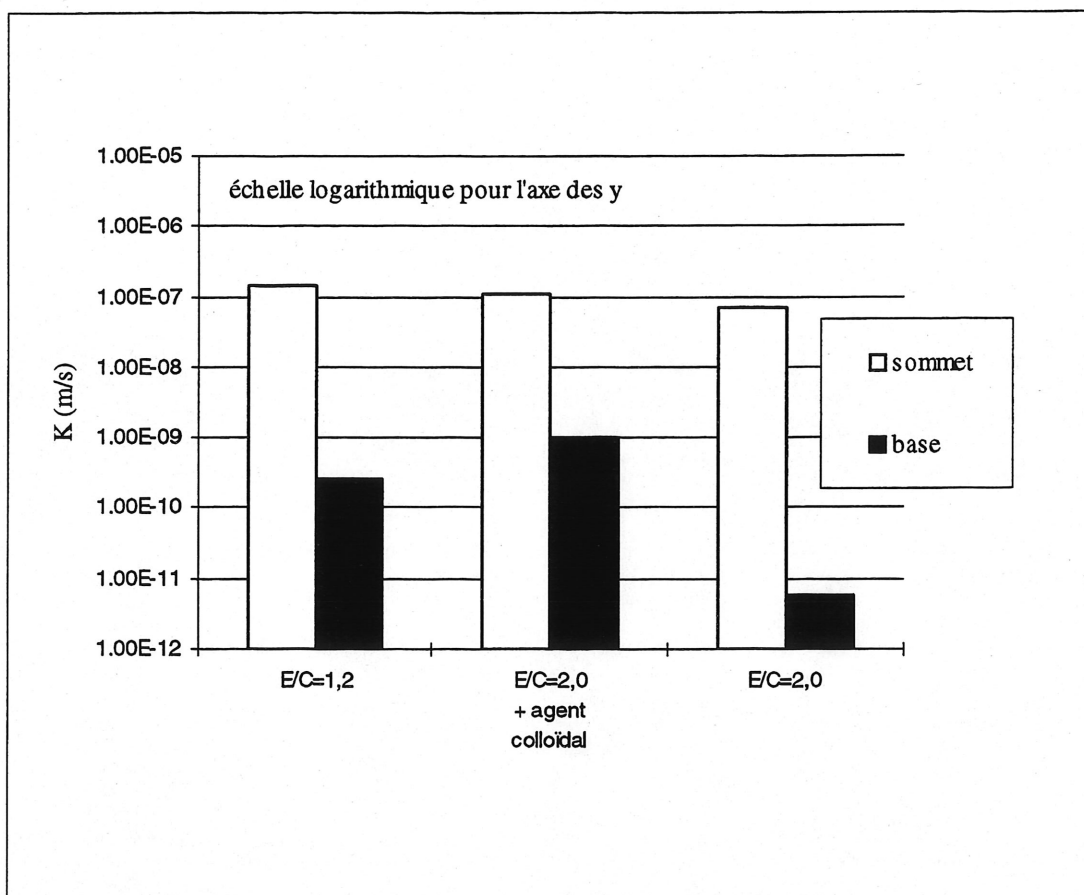


Figure 5.3 Influence du rapport E/C du coulis sur la perméabilité à l'eau après injection

5.3.4 Effet du ressuage forcé

La description des échantillons dans le tableau 5.2 et les considérations faites sur l'effet du ressuage forcé dans le chapitre 4 permettent d'expliquer les variations de perméabilité tout au long d'une colonne. Le tableau 5.3 récapitule les rapports entre perméabilités au sommet et à la base des colonnes pour lesquelles les essais ont été réalisables.

TABLEAU 5.3 VARIATION DE L'EFFICACITÉ DE L'INJECTION AVEC LA DISTANCE INJECTÉE

E/C	Colonne	$K_{\text{sommet}}/K_{\text{base}}$	Taux de ressuage forcé
2.0	2	12500	62%
2.0 + agent colloïdal	1	130	55%
1.2	2	560	60%

Lorsque l'on relie ces rapports avec le taux de ressuage forcé de chaque type de coulis (Figure 5.4), on constate que de faibles variations dans le ressuage forcé implique de grandes variations de perméabilité tout au long des colonnes. L'amplitude de ces variations croît de façon logarithmique avec le ressuage forcé.

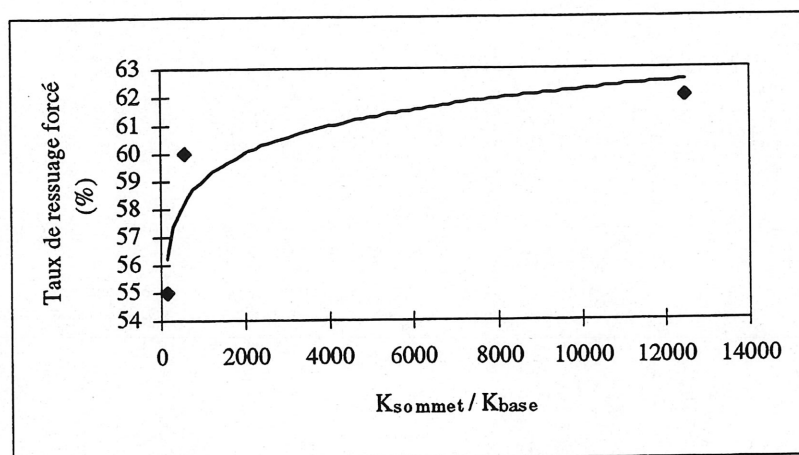


Figure 5.4 Influence du ressuage forcé sur le gradient de perméabilité au long des colonnes

5.3.5 Effet de l'ajout d'agent colloïdal

Les colonnes injectées par des coulis contenant ou non un agent colloïdal ne montrent pas de variations importantes de perméabilité. Pour ces deux types de coulis, la perméabilité au sommet des colonnes est de l'ordre de $1\text{E-}07$ m/s alors qu'à la base elle est de $5\text{E-}09$ m/s en moyenne (Tableau 5.2). Même si l'agent colloïdal augmente la viscosité des coulis (Chapitre 4), il permet une injection de qualité équivalente à celle des mélanges sans ajout.

5.3.6 Rayon d'influence de l'injection

L'injection d'un coulis de ciment dans le sable d'Ottawa peut être considérée comme efficace si elle permet un remplissage des vides du milieu de façon à obtenir une perméabilité après injection d'environ $1\text{E}-10$ m/s. Parmi les colonnes testées, toutes vérifient cette condition à leur base (Tableau 5.4)

TABLEAU 5.4 RAYON D'INFLUENCE DE L'INJECTION

E/C	Agent colloïdal	K avant injection (m/s)	K après injection base (m/s)	K après injection sommet (m/s)
2,0	non	5,0E-04	6,0E-12	6,5E-08
2,0	OUI	5,2E-04	1E-09	1E-07
1,2	non	5,0E-04	2,5E-10	1,4E-07

Par contre, 36 cm plus haut, le traitement paraît beaucoup moins efficace. On a une diminution de perméabilité tout au long des colonnes injectées de l'ordre de $1\text{E}-09$ m/s par centimètre de colonne. Ceci signifie que, pour le coulis de rapport $\text{E/C}=2,0$; sans agent colloïdal, l'efficacité de l'injection est assurée jusqu'à 6 cm seulement du point d'injection.

5.4 Conclusion

Seuls neuf essais de perméabilité à l'eau ont finalement été réalisés. Ils ont permis de faire quelques constatations:

- l'étanchement du sable est plus efficace avec les coulis à fort rapport E/C (on se limitera à $\text{E/C}=2,0$) mais le ressuage forcé important de ces mélanges crée une augmentation de perméabilité avec la distance au point d'injection.
- avec ce même type de coulis (et relativement au coulis à faible rapport E/C), on a une forte diminution de l'efficacité du traitement avec la distance au point d'injection, étant donné l'existence de phénomènes de ressuage statique et forcé: l'injection permet de diminuer la perméabilité initiale des colonnes ($1\text{E}-04$ m/s) à $1\text{E}-07$ m/s uniquement sur les six premiers centimètres de la colonne dans les meilleurs cas.

Chapitre 6

INJECTIONS DE COULIS DE CIMENT EN SEMI-GRANDEUR

6.1 Introduction

Jusqu'à présent, l'aptitude d'un coulis à injecter un milieu granulaire a été testée dans des petites colonnes de plexiglas de 22 mm de diamètre. À partir de cet essai normalisé, c'est la distance de propagation du coulis à travers le sol que l'on a analysée. L'injection a été faite par la base des colonnes et était limitée à une surface de 380 mm^2 . Dans le cas d'une injection sur chantier, celle-ci s'effectue par propagation radiale du coulis, à partir d'un tube vertical d'injection placé dans le terrain. Dans cette partie de l'étude, cette méthode est simulée en laboratoire. Bien sûr, le volume à injecter ne sera jamais infini comme celui d'un terrain naturel mais l'utilisation de cylindres de 50 cm de diamètre permet de représenter un échantillon de sol de dimensions plus pertinentes que celles des colonnes de l'essai d'injection normalisé.

6.2 Préparation des essais

6.2.1 Matériaux et dispositif

Le dispositif présenté au chapitre 3, comprend un cylindre de 50 cm de diamètre pour une hauteur de 1,20 m. Le sable à injecter doit être introduit dans ce réservoir cylindrique pouvant contenir un volume de $0,25 \text{ m}^3$ de sol (Figure 6.1).

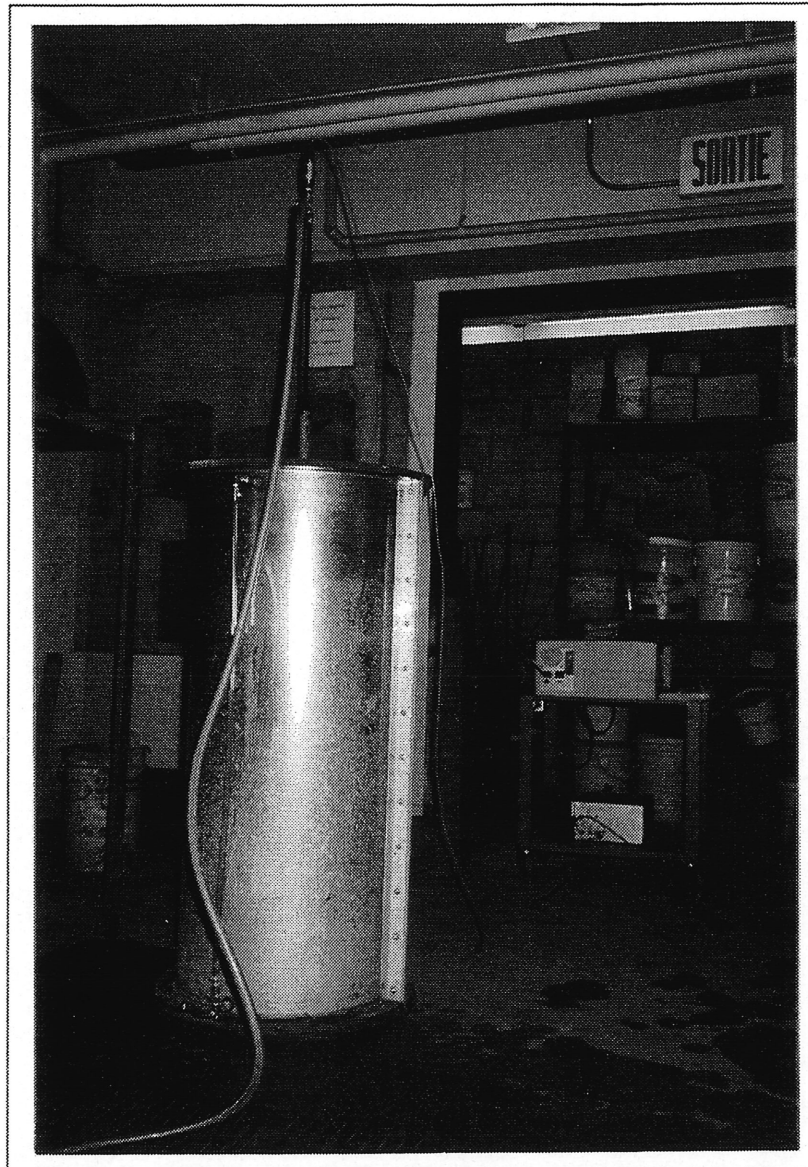


Figure 6.1 Cylindre de sable destiné à l'injection

a) Sable

Le sable considéré est le sable Aimé-Côté de granulométrie 0,08/5,00 mm utilisé à l'état naturel ou sous forme des deux granulométries (0,08/0,63 mm et 0,63/2,50 mm) obtenues par tamisage (Figure 6.2). Des couches de granulométries différentes sont ainsi mises en place dans certains cylindres.

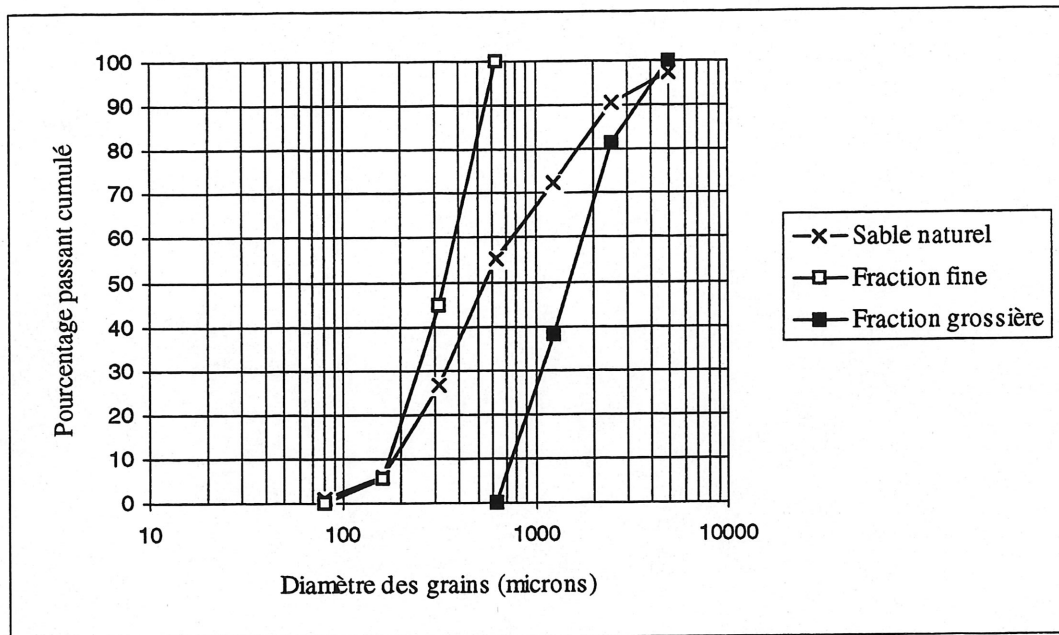


Figure 6.2 Courbes granulométriques des sables utilisés pour les injections en semi-grandeur

Afin de pouvoir comparer l'efficacité de l'injection dans divers milieux modélisés par des teneurs en eau, des classes granulométriques de sable différentes, le matériau doit être mis en place avec une méthode identique d'un essai à l'autre.

Dans le cas d'injection en milieu saturé, le sable sec est mis en place dans le cylindre et on injecte de l'eau (de la même façon que l'on injectera le coulis ultérieurement). La saturation est considérée comme atteinte lorsqu'une couche d'eau apparaît en surface du volume de sable. Cette méthode de saturation nécessite beaucoup de prudence car l'eau a tendance à se propager en remontant le long du tube d'injection, en réarrangeant les grains de sable sur son passage. Il peut même y avoir soulèvement du sable. Des fissures, et par conséquent des chemins préférentiels que peut utiliser le coulis pendant sa propagation, se forment dans la masse. Aussi, un seul cylindre est rempli de sable saturé. On préfère au sable saturé un sable humide. L'humidification du sable, à 10%, est alors réalisée préalablement à l'introduction du sable dans le cylindre. Pour cela, on malaxe les quantités d'eau et de sable nécessaires avant mise en place.

b) Coulis

Les essais sont réalisés à partir de coulis de ciment microfin uniquement. Dans un premier temps, c'est un coulis ayant injecté totalement les petites colonnes de l'essai normalisé qui est retenu pour l'injection en semi-grandeur:

- $E/C = 1,2$;
- Teneur en superplastifiant: 1,25% (extrait sec).

Dans certains cas, on teste également un coulis de rapport E/C égal à 0,6 et contenant 2,0% d'extrait sec de superplastifiant.

Le malaxage des composants du coulis est effectué dans un malaxeur à hélice, à axe vertical (Chapitre 3). Pour chaque gâchée, on incorpore 30 kg de ciment, d'où un volume approximatif de 45 l de coulis.

6.2.2 Milieux injectés

Trois cylindres de sable sont traités par injection. On fait varier le type de sable, sa teneur en eau et le type de coulis. Deux essais sont réalisés sur le sable naturel brut. Le troisième cylindre est confectionné à partir de la fraction fine et de la fraction grossière de ce sable: une alternance de couches d'épaisseurs variables permet de simuler un sol hétérogène (Figure 6.3).

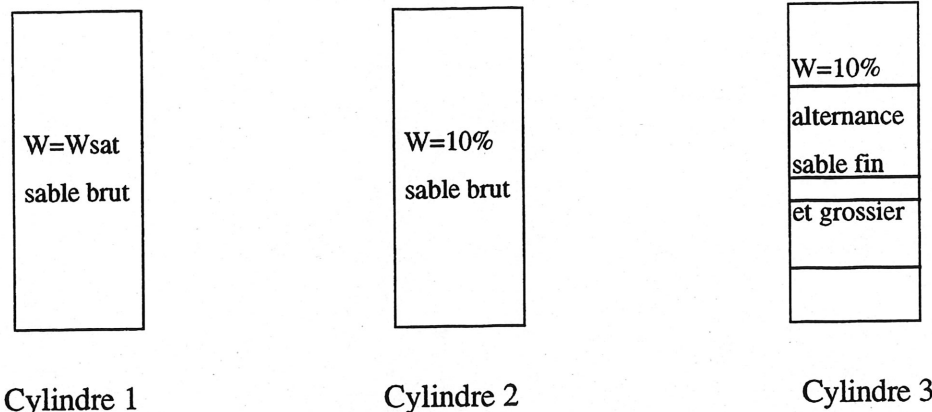


Figure 6.3 Milieux injectés dans les cylindres

Une fois que les matériaux sont en place dans les cylindres, la porosité du milieu fabriqué est évaluée. Elle est fonction de la teneur en eau du sable, de sa masse volumique en place et de la masse volumique des grains (Tableau 6.1). Pour le sable Aimé Coté saturé (teneur en eau 30%), la porosité moyenne dans le cylindre est de 33%. Elle augmente jusqu'à 40% pour le sable Aimé Coté humide (teneur en eau 10%). Dans les cylindres comprenant une alternance granulométrique (teneur en eau 10%), les couches de sable fin ont une porosité moyenne de 33%. Elle passe à 51% dans les couches de sable grossier.

TABLEAU 6.1 MATÉRIAUX UTILISÉS POUR L'INJECTION DES CYLINDRES

Cylindre	Type de sable	Teneur en eau (%)	Porosité (%)	Masse volumique en place (g/cm^3)	E/C (ciment microfin)
1	Naturel, brut	Saturé 30%	33	2,10	1,2 puis 0,6
2	Naturel, brut	10	40	1,70	1,2
3	Naturel, tamisé: sable fin + sable grossier	10	fin: 33 grossier: 51	fin: 1,88 grossier: 1,47	1,2

6.2.3 Suivi des débits et des pressions d'injection

Les injections sont pratiquées en remontant, en trois points d'injection, espacés de 30 cm.

Durant tout l'essai, un capteur, placé à l'extrémité supérieure du tube d'injection donne la pression d'injection réellement appliquée (Chapitre 3). Le système d'acquisition relié au capteur est programmé pour effectuer une mesure par seconde. On obtient ainsi la courbe pression d'injection en fonction du temps, ce qui permet de surveiller le bon déroulement de l'essai et de réagir si il y a montée soudaine en pression.

On surveille également le débit d'injection tout au long de l'essai: le volume de coulis restant à injecter est évalué périodiquement par mesure du niveau du coulis dans le réservoir. On trace également une courbe débit d'injection en fonction du temps.

La viscosité des coulis est contrôlée par un essai au cône Marsh. Cet essai est répété pendant l'injection, si celle-ci s'avère de longue durée.

6.3 **Injection des cylindres**

Chaque essai a fourni des courbes donnant la pression et le débit d'injection au cours du temps. Ces graphiques figurent dans l'annexe 3. La description du déroulement des essais ci-dessous s'y réfère.

6.3.1 Cylindre 1

Dans ce premier cylindre, la saturation du sable par injection d'eau a créé un réarrangement des grains et donc un tassement. La hauteur initiale du sable est d'environ 75 à 80 cm.

L'essai est composé de trois phases que l'on peut identifier sur la courbe donnant la pression d'injection au cours du temps (Annexe 3). Un coulis de rapport $E/C=1,2$ est préparé et injecté à une pression moyenne de 315 kPa (45 psi) pendant un peu plus de huit minutes, au

premier point d'injection du tube, c'est-à-dire à 30 cm de la base du cylindre. Le débit d'injection est resté relativement stable pendant cette première phase.

La progression semblant satisfaisante et le volume de coulis restant étant très faible, il est décidé de fabriquer un deuxième coulis plus épais, soit avec un rapport E/C de 0,6. Il est injecté au deuxième point d'injection du cylindre, soit à environ 60 cm de sa base. Le capteur de pression enregistre alors une montée en pression très rapide qui ne peut être contrôlée instantanément et provoque le claquage d'un tube du circuit d'injection.

Pour terminer l'injection, le restant de coulis (environ 32 litres) est malaxé à nouveau avec un surplus d'eau ce qui porte son rapport E/C à environ 0,96. L'injection se poursuit jusqu'à apparition du coulis à la surface du sable. L'essai est alors arrêté afin d'éviter une propagation du coulis par gravité et non plus sous l'effet de la pression d'injection.

Le démoulage de ce premier cylindre laisse apparaître un bulbe injecté (Figure 6.4). Le coulis n'a pas atteint les parois du cylindre: la distance maximale atteinte par le mélange à E/C=1,2 est de 20 cm de part et d'autre du premier point d'injection.

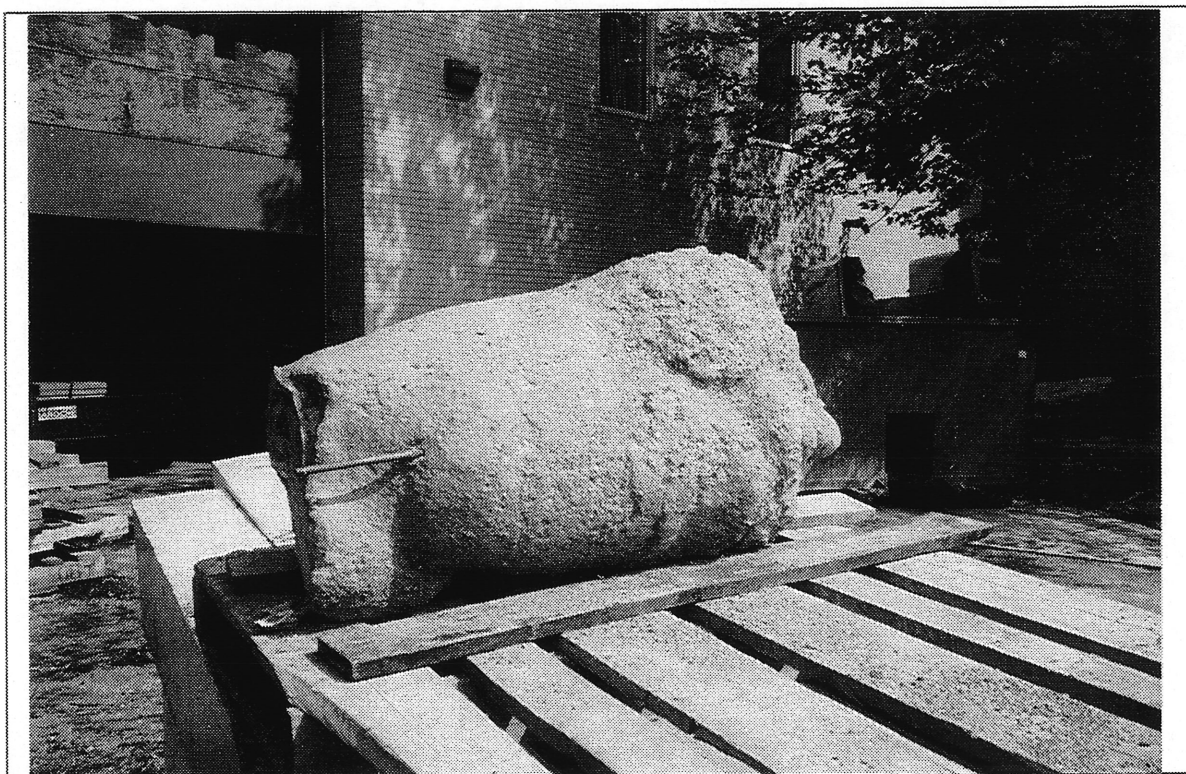


Figure 6.4 Cylindre injecté 1

La hauteur totale de la zone injectée est d'environ 75 cm. D'après l'estimation de la porosité initiale du milieu, on calcule que le volume des vides est d'environ 50 litres. Or, durant l'injection, c'est un volume de 40 litres de coulis qui a été utilisé. Ceci est dû au ressuage du coulis: le sable joue le rôle de filtre. Les grains de ciment bloquent alors les interstices entre les grains de sable, le coulis ne progresse plus. Parallèlement, il y a aussi compaction des grains de sable sous l'effet de la progression du coulis vers l'extérieur du cylindre. Plus on s'approche des parois, plus les grains de sable sont compactés et le volume des vides intergranulaires réduit.

6.3.2 Cylindre 2

Devant la difficulté de ne pas remanier le sol lors de la saturation du milieu par injection d'eau, on procède, pour ce deuxième essai, avec un sable Aimé Coté, non tamisé, humidifié à une teneur en eau de 10% avant mise en place dans le cylindre. Ce cylindre est rempli jusqu'à une hauteur de 1,13 m. L'injection n'est faite qu'au premier point d'injection, c'est-à-dire à 30 cm de la base du cylindre, avec un coulis de rapport E/C=1,2. Dans l'annexe 3, on constate qu'il y a montée en pression au début de l'essai: il est probable qu'un léger blocage du coulis soit apparu dans les tubes d'amenée du coulis. Il y a ensuite «débouillage» et injection normale du coulis à une pression moyenne de 240 kPa (35 psi). Après environ dix minutes d'essai, une fissure commence à se former à la surface du sable. Une partie de la surface s'affaisse alors brutalement, laissant au coulis un chemin préférentiel de propagation pour se rendre jusqu'à la surface. L'essai est arrêté. Tout au long de l'essai, le débit d'injection est relativement constant, excepté lorsque le coulis atteint la surface. Alors le débit augmente de façon non négligeable.

Finalement, après démoulage, on constate que l'injection a concerné un rayon d'environ 22 à 25 cm (Figure 6.5) dans la partie basse du cylindre (sur les 68 premiers centimètres). Au niveau supérieur, la mise en place du sable n'a pas été suffisamment uniforme et une grande partie du sable (trop compacté) n'a pas été injectée.

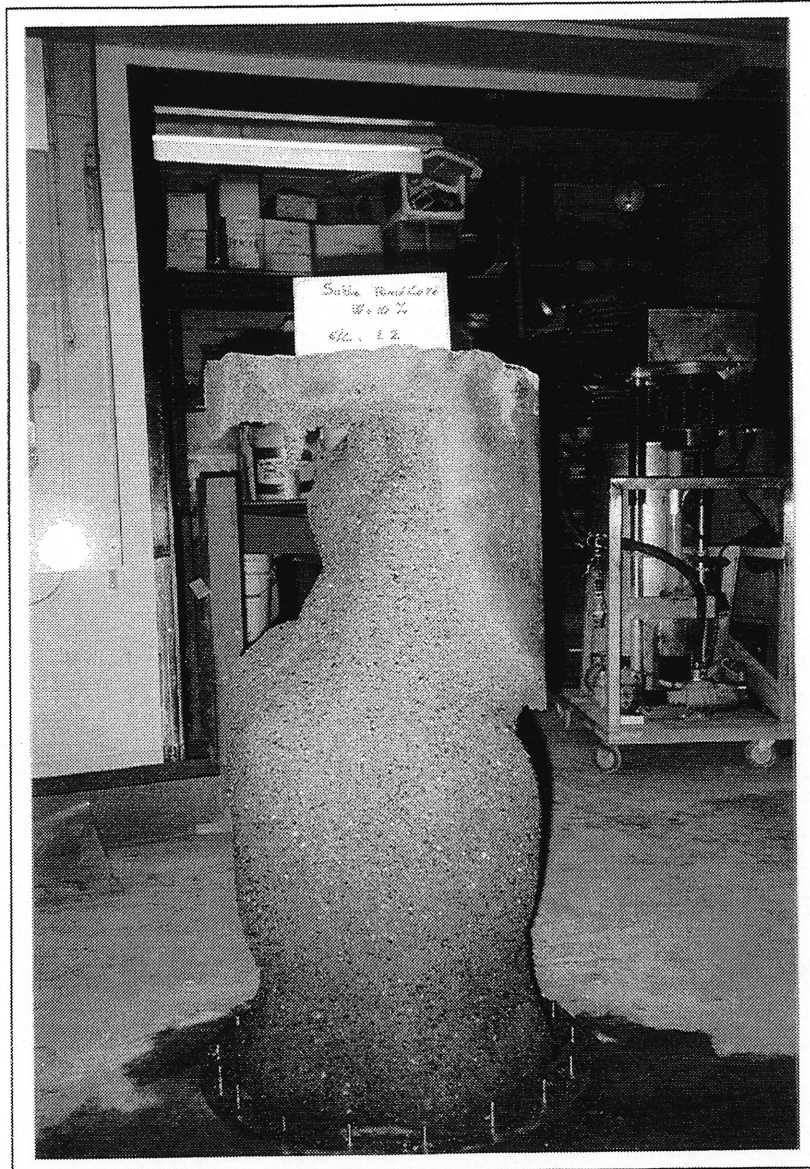


Figure 6.5 Cylindre injecté 2

6.3.3 Cylindre 3

Afin de simuler un sol possédant des couches de granulométries différentes, le troisième cylindre est confectionné par alternance de couches de sable Aimé Coté, tamisé à 0,08/0,63 mm et à 0,63/2,5 mm. Comme pour le second cylindre, on humidifie le sable à une teneur en eau de 10% avant mise en place dans le cylindre. Sur toute la hauteur du cylindre, on compte deux couches de sable fin et deux couches de sable grossier. Le tout est «coiffé» d'une couche de sable Aimé Coté

brut (figure 6.6). Les deux premiers points d'injection se trouvent ainsi dans le sable grossier et le dernier dans le sable fin.

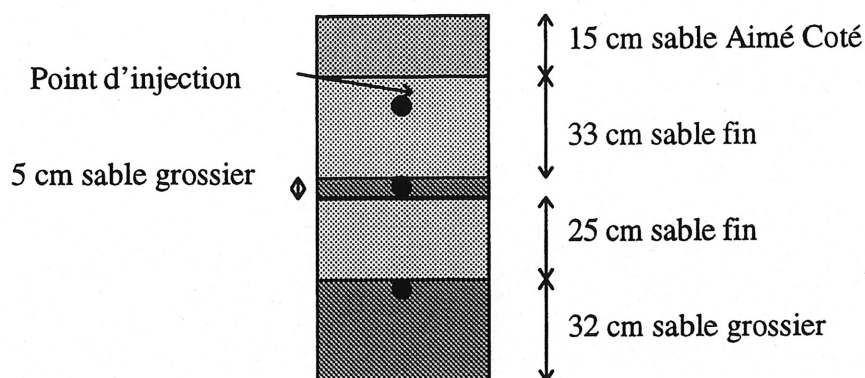


Figure 6.6 Mise en place du cylindre 3

Ce troisième essai est réalisé en deux phases. Une première injection ($E/C = 1,2$) est effectuée au premier point d'injection, dans le sable grossier, pendant environ 23 minutes soit jusqu'à injection du volume total de coulis fabriqué. Au début de l'essai, on constate une montée subite en pression (Annexe 3). On peut penser qu'il y a, comme pour l'injection du cylindre 2, un blocage temporaire dans les tubes d'amenée du coulis. Puis, l'injection se poursuit ne nécessitant qu'une faible pression (environ 17 kPa soit 2,5 psi). Le débit est resté relativement constant après déblocage des tubes d'amenée du coulis.

Après injection de la totalité du volume de coulis initialement fabriqué, le niveau du coulis dans le cylindre (visible grâce à un tube flexible transparent parallèle au cylindre) étant situé au-dessus du deuxième point d'injection, on passe directement à l'injection par le troisième point, situé dans une couche de sable fin. Le débit est alors très lent (0,004 l/s, soit environ dix fois plus faible que lors de la première phase). Le coulis parvient toutefois en surface très rapidement, progressant probablement par un chemin préférentiel le long du tube d'injection. En effet, le faible débit s'explique par la difficulté de progression du coulis dans le sable fin. L'essai est alors arrêté pour éviter une progression par gravité du coulis arrivé en surface. Avant d'arrêter définitivement l'essai, une tentative d'injection est faite à partir du deuxième point d'injection: un volume de cinq litres pénètre le milieu.

Ce dernier essai permet d'observer au démoulage les variations de la distance injectée en fonction du type de sable (Figure 6.7). Les couches de sable grossier sont totalement injectées, le coulis a atteint la paroi du cylindre. par contre, dans les couches de sable fin, le milieu est injecté sur un rayon maximal de 12 cm, parfois moins.

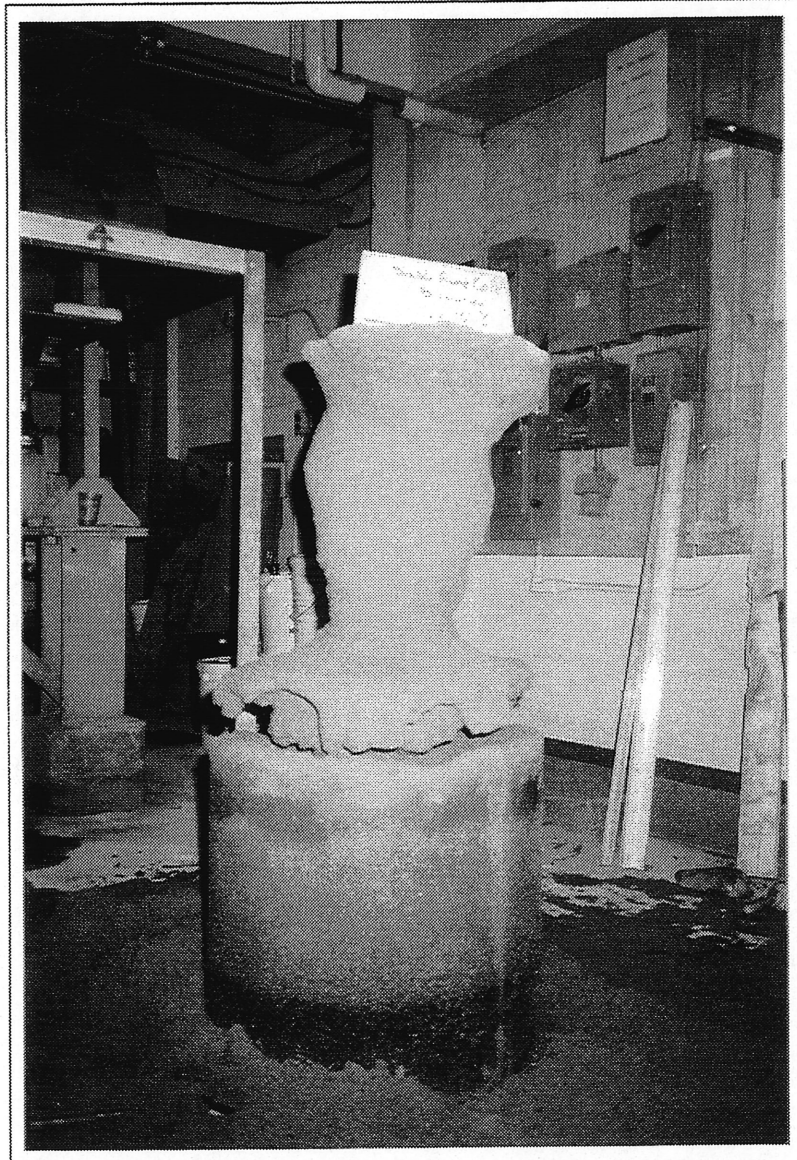


Figure 6.7 Cylindre injecté 3

6.3.4 Pénétrabilité des coulis

Les résultats obtenus dans les cylindres peuvent être confrontés aux différents critères de pénétrabilité présentés au chapitre 2. En particulier, l'application de la loi des filtres ne donne pas le résultat escompté: elle stipule que le coulis est apte à traverser tous les sables utilisés ici. Or, ce n'est pas vérifié pour le sable Aimé Coté naturel, saturé et surtout pour le sable fin (Tableau 6.2).

TABLEAU 6.2 VÉRIFICATION DE LA LOI DES FILTRES

Type de sable	Sable naturel		Sable fin	Sable grossier
Teneur en eau (%)	30 (saturé)	10	10	10
d_{15} du sable (microns)	250	250	200	800
d_{85} du coulis (microns)	7,5	7,5	7,5	7,5
$(d_{15})_{\text{sable}}/(d_{85})_{\text{coulis}}$	33	33	26	106
Pénétration dans le cylindre (rayon en cm)	20	25 (totale)	6	25 (totale)

Il semble que les résultats des injections en semi grandeur soient plus proches du critère donné par Mitchell (1981) et qui prétend l'injection possible pour un rapport $(d_{15})_{\text{sable}}/(d_{85})_{\text{coulis}}$ supérieur à 24. Ainsi, dans les essais réalisés ici, à une teneur en eau de 10%, l'injection serait possible pour un rapport $(d_{15})_{\text{sable}}/(d_{85})_{\text{coulis}}$ supérieur à 30. Ce coefficient doit être majoré pour un milieu saturé. De plus, ces valeurs sont données pour un coulis de ciment microfin à $E/C=1,2$ et contenant 2% de superplastifiant: ce mélange présente un taux de ressuage forcé de 33%. Ce paramètre est très important car au fur et à mesure de l'avancée du coulis, E/C augmente (Chapitre 5). Alors, à une certaine distance du point d'injection, le coulis n'est plus suffisamment concentré en grains de ciment pour assurer le colmatage des pores.

6.4 Essais après injection

6.4.1 Carottage des colonnes injectées

Le sable imprégné et formant un mortier avec le coulis durci est carotté pour des essais de qualification du traitement. Le coulis n'agit pas de la même façon en tout point du massif de sol: il se propage radialement sur une certaine distance. Il faut donc pouvoir comparer l'action de l'injection en différentes zones de la colonne.

Le patron de carottage est représenté sur la figure 6.8. Des échantillons sont prélevés au niveau du point inférieur d'injection, puis du deuxième point. À chaque niveau, on carotte à 12, puis à 20 cm du centre de la colonne. Les carottages sont parallèles à l'axe vertical des bulbes injectés et sont faits dans un diamètre de 47 mm. Les séries d'échantillons sont prises sur deux sections orthogonales des colonnes.

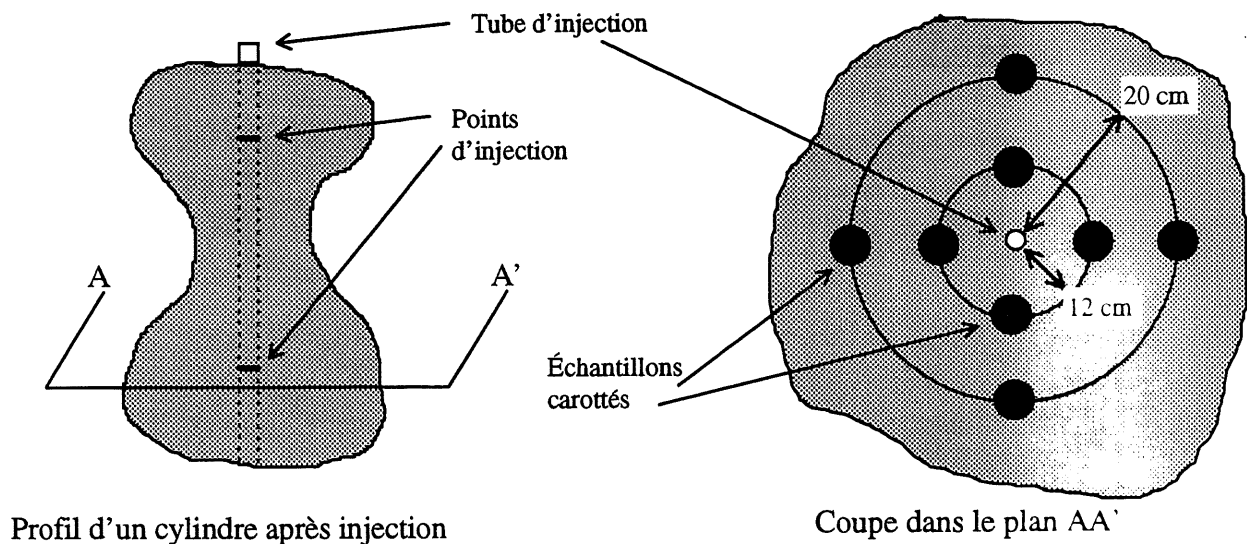


Figure 6.8 Patron de carottage des colonnes injectées

On dispose donc, à chaque niveau de carottage, de huit échantillons: quatre prélevés à 12 cm du centre et quatre prélevés à 20 cm du centre de la colonne. Après carottage, les échantillons sont surfacés et conservés dans de l'eau saturée en chaux.

6.4.2 Essais réalisés

Pour chaque niveau de carottage, deux échantillons prélevés à 12 cm et deux échantillons prélevés à 20 cm du centre sont soumis à des essais de mesure de masse volumique, d'absorption d'eau et de perméabilité à l'eau. Les quatre échantillons restant sont utilisés pour la détermination des modules élastiques et des résistances en compression (Figure 6.9).

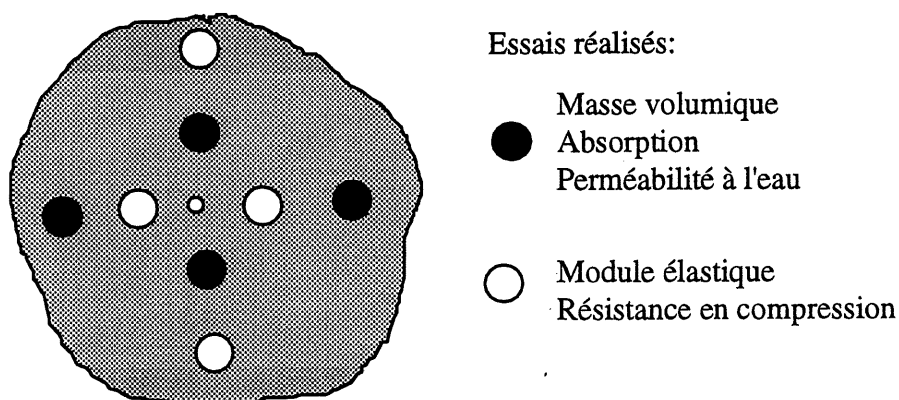


Figure 6.9 Répartition des essais sur mortiers carottés
(vue en plan à un niveau de prélèvement)

6.4.3 Échantillons prélevés

Le patron de carottage présenté antérieurement ne peut pas toujours être respecté: le prélèvement des échantillons est fonction de la forme de la colonne injectée obtenue après durcissement du coulis. Seuls les bulbes 2 et 3 satisfont ce patron au niveau de leur premier point d'injection (Tableau 6.3).

TABEAU 6.3 ÉCHANTILLONS CAROTTÉS

Nombre d'échantillons prélevés	Cylindre 1	Cylindre 2	Cylindre 3
Point d'injection 1	4	8	8 (sable grossier)
Point d'injection 2	2	5	5 (sable grossier)
Point d'injection 3	0	0	4 (sable fin)

Tous ces échantillons ne sont pas testés. Priorité est donnée aux sections comportant les huit échantillons prévus par le patron de carottage. Par soucis de simplification, on appelle "échantillons internes" ceux situés à 12 cm du centre du bulbe et "échantillons externes" ceux situés à 20 cm.

6.4.4 Absorption et perméabilité

Le tableau 6.4 regroupe les résultats des essais d'absorption réalisés sur quelques échantillons de chaque cylindre. Les valeurs sont des moyennes sur deux échantillons identiques. On retrouve également les valeurs de porosité et de perméabilité à l'eau après injection.

TABLEAU 6.4 ESSAIS D'ABSORPTION ET DE PERMÉABILITÉ

Bulbe	Point d'injection	Type d'échantillon	Porosité avant injection (%)	Porosité après injection (%)	Absorption massique (%)	Perméabilité (m/s)
1	base	interne	33	16,5	8,3	---
2	base	interne	40	17	9,8	1,3E-10
		externe	40	20	11,3	---
3	base	interne	51	15	8,0	1,0E-14
		externe	51	20	10,8	1,5E-14
	sommet	interne	33	29	20,3	8,0E-11

Au niveau des points d'injection de la base des cylindres, on constate une augmentation de 15% de l'absorption massique de l'intérieur vers l'extérieur du bulbe 2. Cette augmentation est portée à 35% pour le bulbe 3. Ceci traduit la différence d'efficacité du coulis avec la distance au point d'injection. C'est donc sans surprise que l'on observe que la diminution de porosité suite au traitement est plus importante à 12 cm du point d'injection qu'à 20 cm de celui-ci.

La meilleure injection a été obtenue lors du troisième essai. La porosité initiale dans le sable grossier a été diminuée de 70%. Dans ce même cylindre, on a également le cas du traitement le moins efficace: il a lieu dans le sable fin, au niveau du point d'injection sommital: la porosité n'est réduite que de 12%. On réalise ici la difficulté du coulis à progresser dans le sable fin

relativement au sable grossier. Finalement, la réduction de la porosité est d'autant plus importante que le rapport $(d_{15})_{sol}/(d_{85})_{coulis}$ est grand.

Les essais de perméabilité à l'eau montrent que l'on atteint de bons résultats, en particulier dans le sable grossier du cylindre 3, au niveau du premier point d'injection. La perméabilité est alors de l'ordre de $1E-14$ m/s. L'imprégnation du milieu est très bonne, les contacts coulis/grains de sable sont de bonne qualité.

6.4.5 Résistance en compression

Des essais de résistance en compression sont effectués sur des échantillons identiques à ceux soumis aux tests d'absorption.

Les échantillons possédant les plus faibles taux d'absorption massique ont aussi les plus fortes résistances en compression et les plus forts modules élastiques (Tableau 6.5). Pour les cylindres 1 et 3, les valeurs obtenues pour ces deux paramètres sont relativement élevées pour les échantillons provenant des prélèvements au niveau des premiers points d'injection. Dans le premier cylindre, la présence d'eau (saturant initialement le milieu) doit intervenir dans ce phénomène car à porosité égale avec l'échantillon interne du baril 2 (17% après injection au premier point), on a une résistance et un module environ trois fois supérieurs.

TABLEAU 6.5 ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE

Bulbe	Point d'injection	Type d'échantillon	Rc (MPa)	E (GPa)	Porosité après injection (%)
1	base	interne	41	24	16,5
2	base	interne	12	14	17
		externe	5	9	20
3	base	interne	23	32	15
		externe	15	23	20
	sommet	interne	3	7	29

Si on considère maintenant le type de sable (à teneur en eau identique), les paramètres des échantillons prélevés dans le milieu fin du cylindre 3 (point d'injection 3) ont des valeurs très basses. Par contre dans le sable grossier de ce même baril, à 12 cm du point d'injection 1, on retrouve quasiment les module et résistance obtenus dans le cylindre 1 saturé.

Finalement, la teneur en eau du milieu et la classe granulométrique du sable ont une grande influence sur la résistance et le module élastique. De l'intérieur vers l'extérieur du cylindre de sable, on peut avoir une perte de résistance de 35 à 65% selon la granulométrie du milieu à l'état humide ($S_r = 30\%$).

6.4.6 Conclusion

L'évolution de l'efficacité de l'injection en fonction de la distance au point d'injection est un paramètre important dans la détermination de l'espacement des forages sur le terrain. Lors d'un essai en semi-grandeur, sur le milieu reconstitué, on peut déterminer la perte de résistance et l'augmentation de la perméabilité en fonction de la distance parcourue par le coulis. Selon les critères de performance que l'on souhaite atteindre, on choisira l'espacement des forages primaires et l'ajout éventuel de forages secondaires.

6.5 **Influence de la teneur en eau du sol**

6.5.1 Bilan des observations

L'effet du degré de saturation du sable peut être considéré ici si l'on compare les résultats dans les cylindres 1 et 2 remplis d'un sable Aimé Côté à granulométrie 0,08 / 5,0 mm. Le 1^{er} sable a été injecté à un taux de saturation en eau de 100% ($W_{\text{saturation}} = 30\%$) alors que le 2^e n'était qu'à 30% ($W = 10\%$). Une meilleure progression du coulis a été observée dans le sol non saturé: il a atteint la paroi du cylindre (25 cm) alors qu'il ne progressait que d'environ 15 cm dans le milieu saturé.

Lors de travaux antérieurs [PERRET, 1995], un phénomène similaire avait été mis en évidence lors d'injections à petite échelle. Deux quartz industriels de granulométrie 0,63 / 1,25 mm et 0,08 / 0,63 mm avaient été mis en place dans les petites colonnes normalisées de 36 cm de hauteur et 22 mm de diamètre. Chacun avait été injecté alors qu'il était à l'état saturé ($S_r = 100\%$, $W_{\text{saturation}} = 30\%$) et non saturé ($S_r = 30\%$, $W_{\text{saturation}} = 10\%$) par un coulis de ciment Spinor ($E/C = 1,2$; teneur en superplastifiant = 0,5% d'extrait sec). Dans tous les cas, le coulis avait traversé la colonne de part en part mais à des vitesses différentes (Tableau 6.6).

TABLEAU 6.6 DURÉE DE L'INJECTION DANS LES COLONNES NORMALISÉES [PERRET, 1995]

Milieu	0,08 / 0,63 mm $W = 10\%$	0,08 / 0,63 mm $W = W_{\text{saturation}}$	0,63 / 1,25 mm $W = 10\%$	0,63 / 1,25 mm $W = W_{\text{saturation}}$
Durée pour atteindre 36 cm (s)	8	38	4	11

Dans le milieu fin, l'injection était environ 4,5 fois plus lente pour $S_r = 100\%$ relativement à $S_r = 30\%$. Plus précisément, il avait été noté que le retard du coulis dans le milieu saturé était pris dans les 15 derniers centimètres de la colonne. Dans le milieu de granulométrie moyenne, la différence de vitesse était moins marquée: environ 2,5 fois plus faible dans le milieu saturé relativement au milieu humide. Or, il a été montré que la perméabilité d'un milieu à un fluide augmente avec le degré de saturation du milieu [FREEZE et coll., 1979]. Ceci avait été vérifié lors d'injection en milieu sec: la progression en milieu sec était beaucoup plus difficile qu'en milieu saturé.

6.5.2 Discussion des résultats

Dans un premier temps, la plus grande facilité d'injection en milieu humide, relativement à un milieu sec, s'explique par le fait que les grains de sable secs vont chercher à adsorber à leur surface une certaine quantité d'eau qu'ils prélèvent au coulis d'injection: ce dernier est donc ralenti. Si cette eau liée est déjà présente autour des grains, ce qui est le cas à un degré de saturation de 30%, le coulis n'est pas sollicité et progresse plus facilement dans les vides intergranulaires.

Dans un deuxième temps, lorsque le degré de saturation est différent de 0, le coulis pénètre dans des pores contenant ou non de l'eau. Il fait face à des ménisques intergranulaires. Plus les pores sont de petites tailles, plus les ménisques présentent une tension superficielle élevée. La pression d'injection du coulis doit lutter contre cette tension. Plus le degré de saturation du sol est élevé, plus les ménisques sont de grande taille: la tension superficielle est alors diminuée. En toute logique, le coulis devrait donc avoir plus de facilité à progresser dans un milieu saturé ($S_r = 100\%$) que dans un milieu humide ($S_r = 30\%$). Or, ici, c'est l'effet inverse qui est observé.

Pour expliquer cette contradiction, des paramètres concernant la mise en place des sables dans les cylindres (ou dans les petites colonnes) doivent être pris en compte. En effet, lorsque les cylindres sont remplis de sable à un degré de saturation de 30%, l'humidification est réalisée préalablement dans un malaxeur. Par contre, pour obtenir un milieu saturé, le sable sec est introduit dans le cylindre puis de l'eau est injectée par le tube central d'injection. Or, lorsque la granulométrie des sables est étalée, la pression d'injection de l'eau peut déplacer les plus petits grains sur une certaine distance, jusqu'à ce qu'ils se bloquent et forment un écran plus étanche au coulis (Figure 6.10).

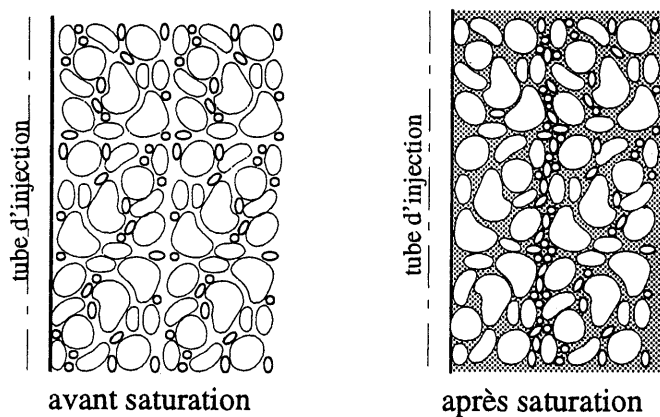


Figure 6.10 Effet de la saturation sur la répartition granulométrique

Dans le cas des cylindres, lorsqu'il atteint la zone à granulométrie plus fine, le coulis perd beaucoup d'énergie pour se frayer un chemin. Lorsqu'il quitte cette zone, il n'est donc plus capable de progresser jusqu'aux parois du cylindre. Dans le cas des petites colonnes normalisées, le volume de sable étant moins important, c'est un ralentissement du coulis que l'on a observé.

La présence de bulles d'air piégées sous l'effet d'une saturation trop rapide et incomplète peut également affecter la progression du coulis.

Finalement, il n'est pas établi qu'il y ait un degré de saturation optimal pour avoir une meilleure injection. Un mode de saturation des cylindres autre que par injection d'eau devra être développé (saturation par percolation d'eau par gravité ou par immersion du cylindre rempli de sable). Ainsi, il sera possible de vérifier si la pénétrabilité d'un coulis, dans un sol de granulométrie donnée, augmente avec le degré de saturation du milieu, comme le laisse supposer la théorie.

6.6 Conclusion

Trois essais d'injection de sol en semi-grandeur ont non seulement permis d'aborder les problèmes techniques que peuvent poser de tels traitements mais aussi de mettre en avant l'importance de certaines caractéristiques du sol et du coulis.

Tout d'abord, sur le plan technique, il est possible d'apporter quelques améliorations au dispositif d'injection, les tubes d'amenée du coulis doivent être les plus courts possible et capables de résister à des pressions pouvant aller jusqu'à 200 kPa afin d'éviter tout risque d'incident.

En ce qui concerne la mise en place du sol dans le cylindre, lors des essais, le tube central était placé au centre du cylindre, puis le sable déversé autour. À proximité du tube, il est difficile d'assurer le même mode de mise en place que dans le reste du cylindre. Il serait donc intéressant de pouvoir insérer le tubage central par fongage: ceci permettrait de réduire la formation de chemins préférentiels empruntés par le coulis le long du tube d'injection.

Le mode de reconstitution d'un milieu saturé par injection d'eau est également à proscrire. La pression d'injection peut avoir tendance à déplacer les grains de sable les plus fins: le sol n'est plus homogène dans tout le volume du cylindre. Pendant sa progression, le coulis rencontre une zone à granulométrie plus fine et se trouve ralenti.

Les critères dérivés de la loi des filtres surestiment beaucoup trop l'aptitude d'un coulis à pénétrer un milieu granulaire. En plus de caractéristiques granulométriques du sol et du coulis, ils doivent tenir compte :

- des caractéristiques physiques du sol: degré de saturation;
- des caractéristiques de stabilité du coulis: plus un coulis a un taux de ressuage forcé élevé, plus son rapport E/C augmente avec la distance parcourue. L'efficacité du traitement est alors diminuée.

De plus, l'injection elle-même peut modifier l'état du sol en place. La progression du coulis a pour conséquence une augmentation de la compacité du sable à proximité des parois du cylindre. Pour que le milieu soit confiné de façon similaire à un milieu naturel, un couvercle aurait du être placé sur le cylindre et ce dernier rempli de sable jusqu'à son sommet.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail était de comprendre quels sont les paramètres pouvant influencer la capacité d'un coulis de ciment à injecter un sol fin granulaire. L'étude a donc débuté par l'analyse des caractéristiques de différents types de coulis (comportement rhéologique, stabilité). Elle s'est poursuivie par leur injection dans des sables de granulométrie donnée: tout d'abord à petite échelle, puis dans des cylindres de grande dimension conçus pour des injections en semi-grandeur.

La distribution granulométrique du ciment et du sol sont les paramètres les plus évidents et sont considérés par la plupart des critères d'injectabilité existant dans la littérature. Cette considération géométrique n'apparaît toutefois pas suffisante pour prévoir la pénétrabilité d'un coulis dans un sol. Il faut également tenir compte:

a) des caractéristiques rhéologiques et de stabilité du coulis de ciment (c'est-à-dire de sa formulation):

- la viscosité et le seuil de cisaillement du coulis conditionnent respectivement la durée de l'injection et la distance injectée;
- la tendance au ressuage forcé du coulis sous l'effet de la pression d'injection est un phénomène très important dans les sables qui jouent le rôle de filtre. Tout au long de la progression du coulis, le rapport E/C initial a tendance à augmenter, impliquant ainsi une modification des caractéristiques rhéologiques du coulis et une diminution de l'efficacité du traitement avec la distance parcourue.

b) des caractéristiques du sol à traiter:

- sa compacité, et donc sa porosité en place, influencent le volume des vides dont dispose le coulis pour se propager;
- son hétérogénéité. L'existence de couches de granulométries et de compositions différentes est à l'origine d'une anisotropie de perméabilité: dans un dépôt naturel de type alluvionnaire, par exemple, K_h/K_v peut varier de 5 à 20 ou plus;

- son degré de saturation: un sol humide est plus facilement injectable qu'un sol sec. Une augmentation du degré de saturation du sol devrait améliorer la progression d'un coulis à travers les grains. Mais ceci n'a pas pu être mis en évidence ici. Des défauts de mise en place du sol dans le cylindre ont pu masqué ce phénomène. La saturation du sable par injection d'eau peut perturber le sol et entraîner une migration des petits grains jusqu'à ce qu'ils se bloquent et forment un écran qui ralentit le passage du coulis. Mais cette solution reste hypothétique et devra être vérifiée par la réalisation de nouveaux essais lors de travaux ultérieurs.
- son état de confinement: dans un milieu naturel, le sol est confiné. Pour reproduire cette configuration, le cylindre devra être muni d'un couvercle en contact avec le sable.

Cette étude montre que les essais d'injection en semi-grandeur permettent de reproduire un sol à l'état naturel en laboratoire et de simuler son injection sans avoir à se préoccuper des effets d'échelle intervenant habituellement dans toute modélisation. Une étude géotechnique précise sur le terrain permet de reconstituer un volume donné du sol à traiter: la formulation du coulis d'injection peut être testée et ajustée directement dans ce milieu. Des essais de caractérisation du milieu injecté permettent d'évaluer l'efficacité du traitement d'un plot d'injection et de définir l'espacement des forages sur le chantier en fonction des performances (étanchéité et/ou résistance) que l'on souhaite obtenir.

Cependant, tous les paramètres pouvant jouer un rôle dans l'injection d'un milieu naturel n'ont pas pu être pris en compte dans cette étude. Aussi, on recommande, pour les travaux à venir, de vérifier tout d'abord l'influence du degré de saturation du sable. Pour cela, des essais pourront être faits sur milieux sec, humide et saturé. On prendra soin, pour reproduire un milieu saturé d'utiliser une méthode de saturation à l'eau ne perturbant pas l'homogénéité du milieu.

Ensuite, la granulométrie du sol devra être considérée en fonction de son étalement: plus un milieu a une granulométrie étalée, plus il y a un risque de migration des plus petits grains poussés par une éventuelle eau de circulation ou même par l'avancée du coulis sous pression.

pendant l'injection. Ces grains peuvent former un écran moins perméable au coulis. On pourra vérifier ces hypothèses en effectuant une saturation d'un cylindre de sable par injection d'eau sous pression et en prélevant ensuite des échantillons de sol en différents points sur un même rayon du cylindre. Une analyse granulométrique de ces échantillons permettra de savoir s'il y a eu migration ou non des petits grains, et si c'est le cas, sur quelle distance.

Enfin, d'autres paramètres qui n'ont pas été considérés ici pourront être étudiés comme la présence d'un éventuel écoulement souterrain, la chimie de l'eau du sol, ...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AÏTCIN, P.C. (1989) *Les fluidifiants: des réducteurs d'eau pas comme les autres*, Les bétons haute performance: expérience nord-américaine et française, Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, n° 473, série béton 263, p.151 à 155.
- AÏTCIN, P.C. (1996) *Liants hydrauliques*, Cours de Maîtrise en génie civil, Université de Sherbrooke, automne 1996.
- ALLAN, M.L. KUKACKA, L.E. (1996) *Comparison between slag and silica fumes modified grouts*, ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 1996, p.559 à 568.
- BALLIVY, C., MNIF, T. (1995) *Caractérisation physico-mécanique des coulis de ciment avec ajouts*, Collaboration Université de Sherbrooke - Travaux Publics Canada, 23 p.
- BENHAMOU, O. (1994) *Comportement rhéologique des coulis de liants hydrauliques ultrafins destinés à l'injection*, Paris, Thèse de doctorat en géologie de l'ingénieur, ENSMP, 332 p.
- BOUDAYA, I. (1993) *Répartition de la pression d'injection d'un coulis de ciment dans une fissure*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 182 p.
- BOWEN, R. (1975) *Grouting in engineering practice*, Applied Science Publishers, Londres, 187 p.
- CAMBEFORT, H. (1951) *Les alluvions graveleuses feuilletées et à structure ouverte*, 4^{ème} congrès des Grands Barrages, New Delhi, C.5.
- CAMBEFORT, H. (1964) *Injection des sols: principes et méthodes*, Éditions Eyrolles, Tome 1.
- CAMBEFORT, H. (1964) *Injection des sols: applications*, Éditions Eyrolles, Tome 2.
- CARON, C. (1963) *The development of grouts for the injection of fine sands*, Grouts and drilling methods in engineering practice conference, Butterworths, Londres.
- CIMENTS D'ORIGNY (1993) *Les produits ultrafins*, Document interne à la compagnie Ciments d'Origny.
- DE PAOLI, B., BOSCO, B., GRANATA, R., BRUCE D.A. (1992) *Fundamental observations on cement based grouts (2): microfine cements and the Cemill® process*, Congrès ASCE. Grouting, soil improvement and geosynthetics, New Orleans, Éditions ASCE, p.486 à 499.
- DEERE, D.V. (1976) *Dams on rock foundations, some design questions*, Rock Engineering for Foundations and slopes Conference II, Boulder, Colorado, p.55 à 86.
- DODSON, V.H. (1990) *Concrete admixtures*, Éditions Van Nostrand Reinhold, p. 39 à 71.

- DREUX, G., FESTA, J. (1995) *Nouveau guide du béton*. Édition Eyrolle, 318 p.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater*. Édition Practice Hall, New Jersey.
- HAKANSSON, U. (1992) *Rheological properties of microfine cement grouts*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 7, N° 4, p.453 à 458.
- HAKANSSON, U., HASSLER, L., STILLE, H. (1992) *Properties of microfine cement grouts with additives*. Conference on grouting in geotechnical engineering ASCE, New Orleans.
- HÄSSLER, L., HAKANSSON, U., HÄKAN, S. (1992) *Computer simulated flow of grouts in jointed rock*. Conference on grouting in geotechnical engineering ASCE, New Orleans, p. 461 à 473.
- HELAL, M., KRIZEK, R.J. (1992) *Preferred orientation of pore structure in cement-grouted sand*. Congrès ASCE, Grouting, soil improvement and geosynthetics, New Orleans, Éditions ASCE, p.526 à 540.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1981) *Introduction à la géotechnique*, deuxième édition, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.
- HOULSBY, A.C. (1990) *Construction and design of cement grouting. A guide to grouting in rock foundations*. Wiley series of practical construction guides. Édition M.D. Morris, 442 p.
- KAROL, R.H. (1985) *Grouting penetrability, Issues in dam grouting*, Éd. Wallace Haymard Baker, New York, 165 p.
- KAROL, R.H. (1990) *Chemical grouting*, 2^{ème} édition, Éd. Marcel Dekker, New York, 465 p.
- KHAYAT, K.H., BALLIVY, G., GAUDREAU, M. (1997) *Underwater repair of the St. Lambert lock*, Concrete International, Vol. 19, n° 3, Mars 1997, p.36 à 40.
- KHAYAT, K.H., YAHIA, A. (1997) *Effect of rheology-modifying admixture-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout*, ACI Materials Journal, publication acceptée pour Nov.-Dec. 1997 .
- Laboratoire de mécanique des roches (1994) *Cours intensif sur les injections de coulis de ciment: méthode de contrôle en laboratoire et en chantier*, département génie civil, Université de Sherbrooke.
- LEGRAND, C. (1980) *L'état floculant des pâtes de ciment avant prise et ses conséquences sur le comportement rhéologique. Comportement rhéologique des structures des matériaux*, 15^e Colloque annuel du groupe français de rhéologie, Paris, Éd. Ancien ENPC, p.129 à 136.
- LOMBARDI, G. (1985) *The role of cohesion in cement grouting of rock*, 15th ICOLD, Lausanne, Q 58, R13.

- MILTIADOU, A. (1990) *Contribution à l'étude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 353 p.
- MITCHELL, J.K. (1981) *Soil improvement - State of the art report*. Proceedings X ICSMFE, Stockholm, Volume 4, p.509 à 565.1.
- MNIF, T. (1992) *Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques des coulis d'injection à base de suspensions de ciment*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 126 p.
- MNIF, T. (1996) *Technical guide to pressure grouting in the masonry walls of the heritage locks of the Rideau Canal, Ontario*, Travaux publics Canada, 196 p.
- NIEMANTS, P. (1981) *Étude du comportement des voiles d'étanchéité injectés dans les fondations rocheuses de barrage*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 262 p.
- NONVEILLER, E. (1989) *Grouting, theory and practice*, Éd. Elsevier, 250 p.
- Norme NF P18-891 (1986) *Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits pour injection dans des structures en béton - Essai d'injectabilité à la colonne de sable en milieu sec et humide*, Déc. 1986, 8 p.
- PAILLÈRE, A.M. (1990) *Étude de coulis pour injecter des fines fissures*, Rapport de procès verbal d'essais, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- PAILLÈRE, A.M., SERRANO, J.J., MILTIADOU, A. E. (1993) *Formulation des coulis hydrauliques pour l'injection de fines fissures et cavités dans les structures dégradées en béton et maçonneries*, Bulletin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n° 186, p. 61 à 78.
- PAILLÈRE, A.M., GUINEZ, R. (1984) *Recherche d'une formulation de coulis à base de liants hydrauliques pour l'injection dans les fines fissures et les cavités*, Bulletin de liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n° 130, p. 53 à 57.
- PAPADAKIS, M., VÉNUAT, M. (1966) *Fabrication et utilisation des liants hydrauliques*, deuxième édition, Paris, s.n., 391 p.
- PERRET, S. (1995) *Étude en laboratoire de l'injectabilité de coulis à base de ciment microfin dans des sols fins granulaires*, Projet de fin d'études, Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée, Université de Sherbrooke, 113 p.
- SHIMODA, M., OHMORI, H. (1982) *Ultrafine grouting material*, Conference on grouting in geotechnical engineering ASCE, New Orleans, p. 77 à 91.

- SMOAK, W.G., MITCHELL, K.D. (1993) *Effect of High-Range Water Reducers on Cement Grout*, Concrete International, Janvier 93, p.56 à 61.
- TREMBLAY, S., LEPAGE, S. (1994) *Projet de collaboration entre la voie maritime du Saint Laurent et l'Université de Sherbrooke: Réparation sous marine des piliers du Pont Champlain*; Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Inc., 22 p.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers) (1986) *Seepage Analysis and Control for Dams*, Engineer Manual, EM 1110-2-1901.
- WISEUR, V. (1996) *Injectabilité des coulis de ciments ultrafins à ajouts minéraux*, Toulouse, Thèse de doctorat, spécialité génie civil, Université Paul Sabatier, 205 p.

Annexe 1

**Norme NF P18-891 Essai d'injectabilité à la colonne
de sable en milieu sec et humide**

Pour la norme complète voir la copie papier à la Bibliothèque du Frère-Théode
Section Monographie TA 755 P47 1997

Produits spéciaux destinés aux constructions
en béton hydraulique

NF P 18-891

Décembre 1986

**Produits pour injections
dans des structures en béton**

Essai d'injectabilité à la colonne de sable
en milieux sec et humide

Annexe 2

Résultats de l'étude rhéologique des coulis

Essais sur coulis de ciment sans ajouts minéraux

Mélanges		D 1,2	T 0,5	T 0,6	T 1,2	T 2,0	T 2,0 W	S 0,5	S 0,6	S 1,2	S 2,0	S 2,0 W
Ciment		T 10	T 30	T 30	T 30	T 30	T 30	Micro	Micro	Micro	Micro	Micro
Rapport E/C		1,2	0,5	0,6	1,2	2,0	2,0	0,5	0,6	1,2	2,0	2,0
Teneur en superplastifiant		1,25	2,0	2,0	1,25	1,25	2,0	2,0	2,0	1,25	1,25	2,0
Teneur en agent colloïdal		0	0	0	0	0	0,040	0	0	0	0	0,030
Cône Marsh pour 700 ml (s)	5 mn	20,4	29,4	24,9	20,6	20,0	20,6	42,9	32,6	20,7	19,5	21,6
	1 h	20,1	31,8	26,8	20,0	20,4	20,6	44,6	33,5	21,1	20,1	20,3
Mini cône (mm)	5 mn	235	175	188	231	235	204	147	173	221	227	211
	1 h	229	164	185	223	239	228	146	168	222	222	230
Ressuage forcé à 550 kPa (%)	10 mn	2,58	2,49	---	37,48	75,54	3,78	4,26	15,07	32,88	38,73	26,46
	30 mn	3,22	6,63	---	66,07	92,39	5,82	7,66	23,79	58,67	64,55	50,56
Viscosité apparente à 5 mn (cP)	3 t/mn	50	100	50	100	50	100	100	100	50	50	100
	300 t/mn	4	25	13	6	4	5	51	27	6	3	5
Viscosité apparente à 60 mn (cP)	3 t/mn	50	100	100	50	50	100	100	100	100	50	100
	300 t/mn	4	31	16	5	4	6	57	28	6	3	4
Viscosité plastique (cP)	5 mn	0,5	22,4	10,9	3,2	1,7	3,2	47,9	24,3	3,7	1,7	3,2
	1 h	0,4	29,9	11,9	4,0	1,6	3,8	54,2	25,9	4,2	1,5	2,6
Seuil de cisaillement (Pa)	5 mn	0,37	0,50	0,15	0,46	0,24	0,33	0,16	0,27	0,27	0,24	0,43
	1 h	0,27	0,55	0,51	0,43	0,34	0,39	0,29	0,22	0,34	0,22	0,36
Colonne de 0,16/0,63	sable mm	0 cm	5 cm	5 cm	totale	totale	totale	5 cm	12,5 cm	totale	totale	totale

Essais sur coulis de ciment avec ajouts minéraux

Mélanges		T 0,5F	T 1,2F	T 2,0F	D 1,2B	T 1,2B	S 1,2B
Rapport E/C		0,5	1,2	2,0	1,2	1,2	1,2
Teneur en SP		2,0	1,25	1,25	1,25	1,55	1,55
Teneur en fumées de silice		6	6	6	0	0	0
Teneur en bentonite		0	0	0	2	2	2
Cône Marsh pour 700 ml (s)	5 mn	31,2	20,8	20,0	22,5	22,1	23,3
	1 h	34,0	21,1	19,8	23,1	23,2	24,3
Mini cône (mm)	5 mn	166	222	234	214	206	208
	1 h	163	225	232	214	211	205
Ressuage forcé à 550 kPa (%)	10 mn	4,39	43,48	55,11	9,35	12,31	15,78
	30 mn	8,77	80,87	90,87	19,34	22,99	26,96
Viscosité apparente à 5 mn (cP)	3 t/mn	100	50	50	50	100	50
	300 t/mn	36	6	4	8	9	10
Viscosité apparente à 60 mn (cP)	3 t/mn	150	50	50	50	50	50
	300 t/mn	37	7	4	6	9	10
Viscosité plastique (cP)	5 mn	35,1	3,8	2,4	4,6	7,6	9,2
	1 h	38,9	4,6	2,1	3,6	6,8	8,7
Seuil de cisaillement (Pa)	5 mn	0,32	0,32	0,26	0,21	0,35	0,10
	1 h	0,51	0,26	0,23	0,20	0,18	0,12
Colonne de sable 0,16/0,63 mm		0 cm	9,5 cm	10 cm	0 cm	8 cm	35 cm

**Essais de ressuage statique sur quelques coulis de ciment microfin Spinor
(avec et sans ajout)**

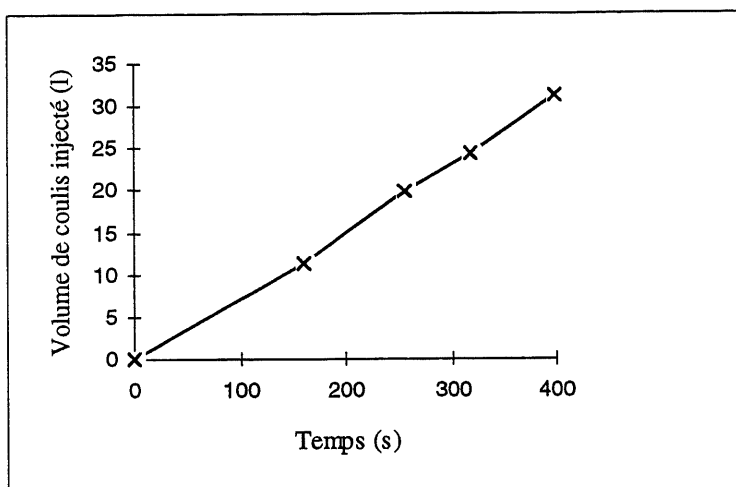
Temps	S 0,5	S 1,2	S 1,2 B	S 2,0 W
E/C et ajout éventuel	0,5	1,2	1,2 + bentonite	2,0 + agent colloïdal
1 heure	---	1,6	0,4	2,8
2 heures	---	2,4	0,8	5,6
24 heures	2,4	28,8	1,2	56

Quantités exprimées en pourcentage du volume initial de coulis

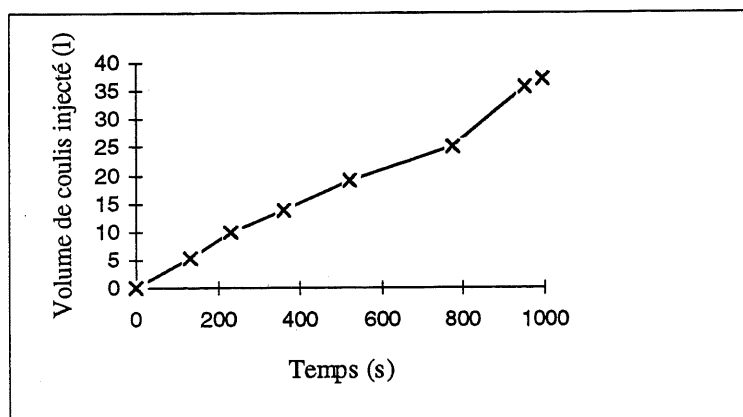
Annexe 3

Résultats des injections en semi-grandeur

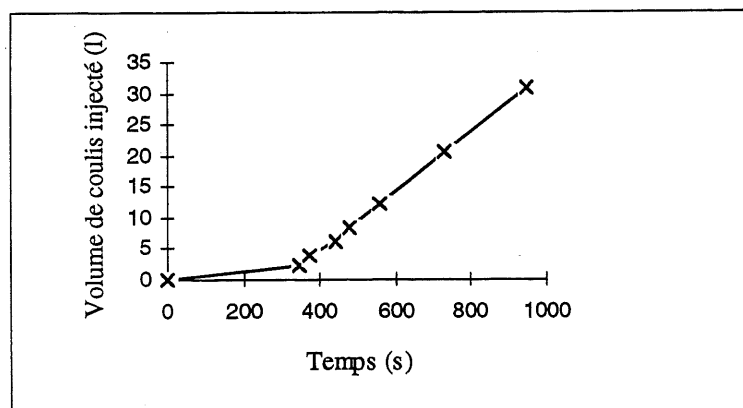
Suivi des volumes de coulis injecté



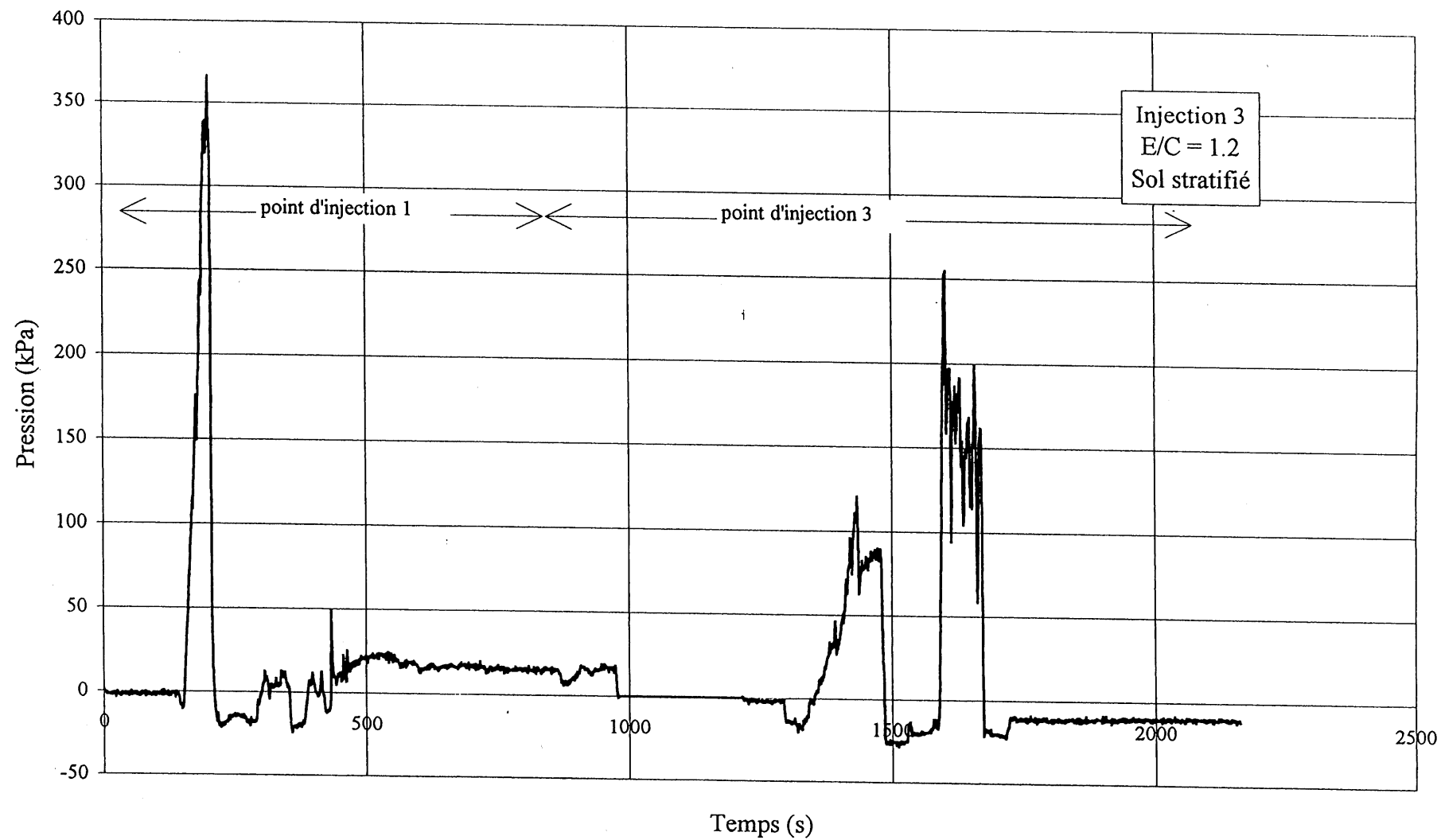
Cylindre 1 - Premier point d'injection

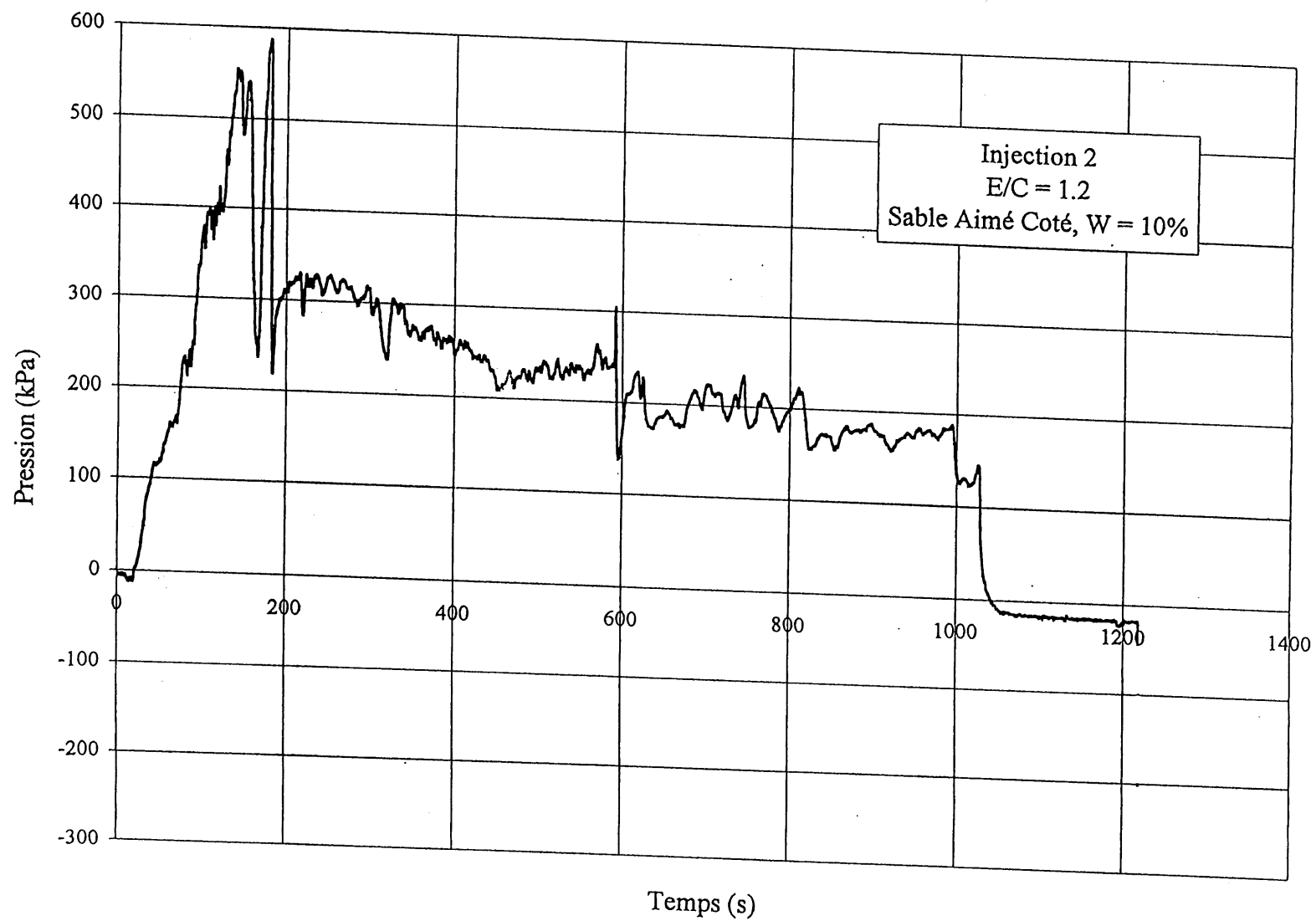


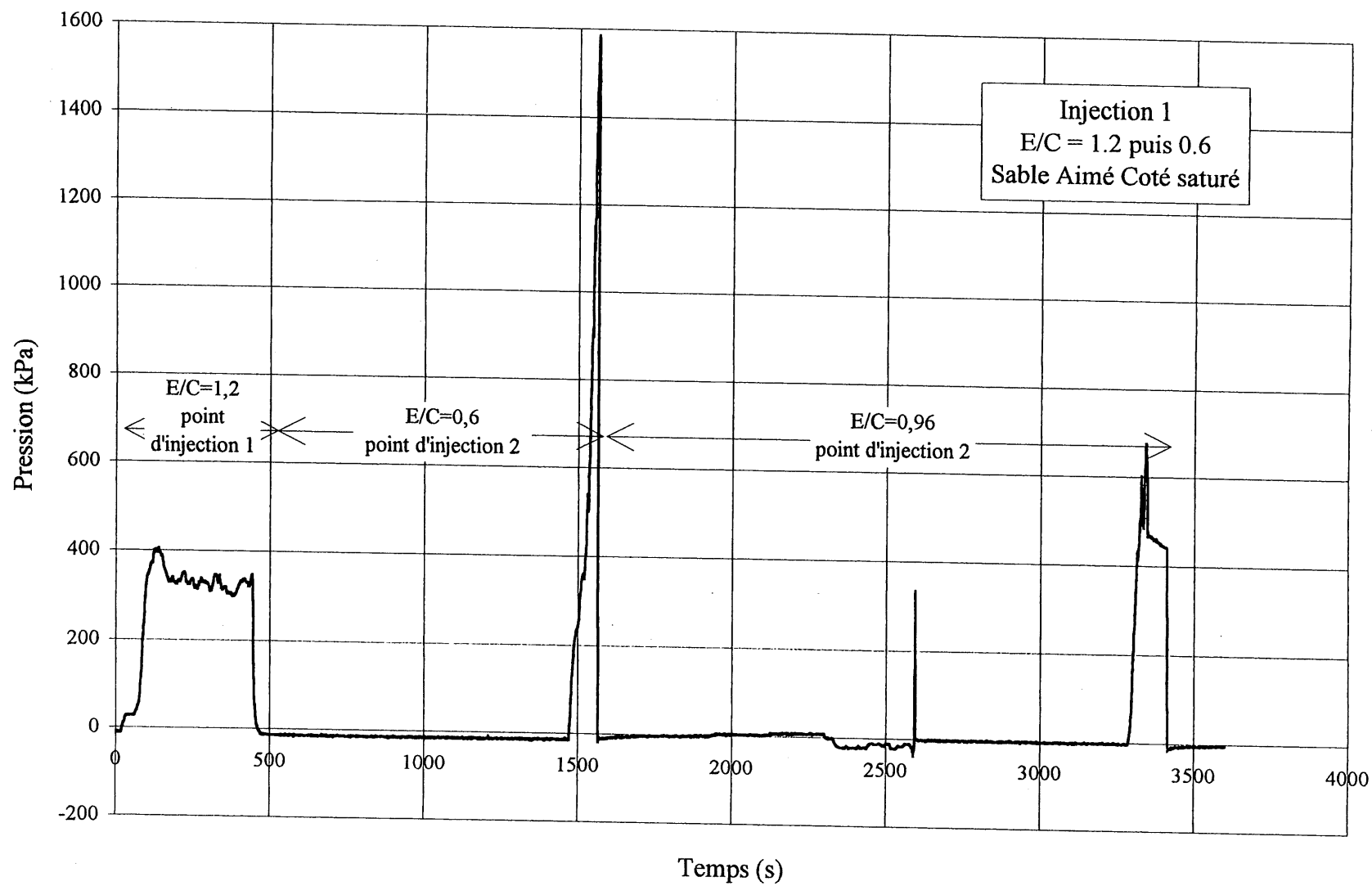
Cylindre 2 - Premier point d'injection



Cylindre 3 - Premier point d'injection







Annexe 4

**Coulis de ciment et injection:
références bibliographiques issues de l'Université de Sherbrooke**

Références bibliographiques issues de l'Université de Sherbrooke : coulis de ciment et injection de coulis de ciment

AÏTCIN, P.C. ; BALLIVY, G. ; PARIZEAU, R. (1984) *Use of condensed silica fume in grouts*. Innovative cement grouting, SP-83, American Concrete Institute, Détroit, p.1 à 18.

BALLIVY, C. ; MNIF, T. (1995) *Caractérisation physico-mécanique des coulis de ciment avec ajouts*. Collaboration Université de Sherbrooke - Travaux Publics Canada, 23 p.

BALLIVY, G. ; BOUJA, A. (1982) *Problématique des injections de coulis de ciment*. Deuxième colloque sur la consolidation et la réfection des infrastructures par les techniques d'injections.

BALLIVY, G. ; SALEH, K. ; MANIEZ, J. ; LANDRY, L.M. ; NADEAU, M. (1989) *Rehabilitation of concrete dams : laboratory simulation of cracking and injectability*. Grouting, Soil Improvment and Geosynthetics. Proceedings of international symposium, Paris, France. Éd. Balkema, Rotterdam.

BALLIVY, G. ; SALEH, K. ; MNIF, T. ; RIVEST, M. ; MIRZA, J. (1993) *Coulis de ciment pour injection de microfissures*. Rapport interne.

BOUDAYA, I. (1993) *Répartition de la pression d'injection d'un coulis de ciment dans une fissure*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke ,182 p.

BOUJA, A. (1994) *Contribution à l'étude de l'injection d'un coulis de ciment en milieu fissuré*. Doctorat en Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke.

KHAYAT, K.H.; YAHIA, A. (1997) *Effect of rheology-modifying admixture-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout*. Accepté pour publication dans ACI-Materials Journal, Nov-Dec. 1997.

KHAYAT, K.H., BALLIVY, G., GAUDREAU, M. (1997) *Underwater repair of the St. Lambert lock*, Concrete International, Vol. 19, n° 3, Mars 1997, p.36 à 40.

Laboratoire de mécanique des roches (1994) *Cours intensif sur les injections de coulis de ciment: méthode de contrôle en laboratoire et en chantier*, département génie civil, Université de Sherbrooke.

MNIF, T. (1992) *Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques des coulis d'injection à base de suspensions de ciment*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 126 p.

MNIF, T. (1996) *Technical guide to pressure grouting in the masonry walls of the heritage locks of the Rideau Canal, Ontario*. Travaux Publics Canada, 196 p.

NIEMANTS, P. (1981) *Étude du comportement des voiles d'étanchéité injectés dans les fondations rocheuses de barrage*, Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 262 p.

ONOFREI, M. (1996) *Évaluation de la durabilité à long terme de coulis à haute performance à base de ciment*. Doctorat en Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke.

PERRET, S. (1995) *Étude en laboratoire de l'injectabilité de coulis à base de ciment microfin dans des sols fins granulaires*, Projet de fin d'études, Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée, Université de Sherbrooke, 113 p.

SALEH, K. ; MIRZA, J. ; BALLIVY, G. ; MNIF, T. (1993) *Selection criteria for Portland and microfine cement based grout*. International conference on grouting in rocks and concrete, Salzburg, 9 p.

TREMBLAY, S. ; LEPAGE, S. (1994) *Projet de collaboration entre la voie maritime du Saint Laurent et l'Université de Sherbrooke : Réparation sous marine des piliers du Pont Champlain* ; Société des Ponts Jacques Cartier et Champlain Inc., 22 p.

Rapports du laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée

BALLIVY, G. (1992) *Étude des techniques d'injection des fissures dans les ouvrages en opération*, GR 92-10-01.

BALLIVY, G. ; COLLIN, J.C. ; MNIF, T. (1992) *Effectiveness of injected grout under hard environmental conditions*, GR 92-02-02.

BALLIVY, G. ; MNIF, T. (1994) *Essais en laboratoire et sur chantier : description et méthodes d'interprétation*, rapport préparé pour Travaux Publics Canada, GR 94-10-01.

BALLIVY, G. ; MNIF, T. (1995) *Caractérisation physico-mécanique des coulis de ciment avec ajouts*, GR 95-03-01.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., BOUDAYA, I. ; NADEAU, M. ; LACASSE, J.P (1992) *Injection de la dalle No 17 par le coulis de ciment type 10*, rapport préparé pour Hydro-Québec, Région Manicouagan, Sécurité des barrages, GR 92-05-03.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., BOUDAYA, I. ; NADEAU, M. ; LACASSE, J.P (1992) *Injection de la dalle No 20 par le coulis de ciment type 50 rebroyé*, rapport préparé pour Hydro-Québec, Région Manicouagan, Sécurité des barrages GR 92-05-04.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., MNIF, T. (1992) *Note technique sur l'utilisation du ciment microfin MC 500*, GR 92-05-06.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., MNIF, T. ; MIRZA, J. (1989) *Rapport sur les essais de caractérisation du coulis d'injection*, GR 89-11-01.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., MNIF, T. ; MIRZA, J. (1990) *Rapport sur les essais de détermination des caractéristiques élastiques et mécaniques du coulis d'injection*, GR 90-05-03.

BALLIVY, G. ; SALEH, K., MNIF, T. ; MIRZA, J. (1992) *Caractérisation mécanique et physique du coulis de ciment à 4, 10 et 20°C*, GR 92-05-05.

DUPUIS, M. (1977) *Recherche sur la perméabilité et l'injection du roc*, GR 77-04-01.

Groupe de travail sur l'injection (1991) *Injection de la dalle No 5 par le coulis de ciment type 10*, rapport préparé pour Hydro-Québec, Région Manicouagan, Sécurité des barrages, GR 91-09-03.

MNIF, T. (1994) *Physico-Mechanics Characterization of proposed grout mixes-Tests results, Publics Works and government Services Canada- Submitted to John Mazhar*, GR 94-12-01.

MNIF, T. (1995) *Analyse et caractérisation de deux ciments microfins (Blue Circle et Celtite)*, GR 95-02-04.

MNIF, T. (1995) *Consultation technique pour la révision du devis d'injection des fondations rocheuses fissurées (injection avec une contre pression d'eau)- Rapport final* préparé pour Travaux Publics Canada, GR 95-02-03.

MNIF, T. (1995) *Rapport d'injection de la dalle 30 par le coulis de ciment Portland- Études des techniques d'injection- Projet D3- Développement des méthodes et produits d'injection dans les structures de béton*, rapport préparé pour l'IREQ, Service Technologie des Matériaux, GR 95-06-01

MNIF, T. (1997) *Essais de ressuage statique et forcé appliqués à des coulis de ciment ordinaire ou microfin*, GR 97-02-03.

PALARDY, D. (1996) *Suivi de l'injection du Pont L.-H.-Lafontaine, Phase 1*, rapport présenté au Ministère des Transports du Québec, GR 96-07-01.

PALARDY, D. ; MNIF, T. (1997) *Synthèse des essais en laboratoire sur coulis de ciment et perspectives de l'injection en chantier- Rapport préliminaire* préparé pour Sogéfibre, GR 97-03-03.

PALARDY, D. ; QUIRION, M. (1997) *Synthèse de l'injection au coulis de ciment en usine- Rapport préliminaire* préparé pour Sogéfibre GR 97-05-02.

PROVENCAL, J. (1978) *Étude sur éprouvettes de la perméabilité d'un calcaire fracturé et injecté d'un coulis de ciment*, GR 78-10-1.

PROVENCAL, J. (1978) *Étude d'un modèle pour l'évaluation de la perméabilité et l'injection du roc*, GR 78-04-1.

WISEUR, V. (1992) *Influence de la fumée de silice sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des coulis de ciment à forte teneur en laitier*, GR 92-12-01.